



ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

**DIVERSIDAD
DE SCARABAEIDOS
EN CINCO LOCALIDADES
DEL NOROESTE
DE LA PROVINCIA
DE BUENOS AIRES**

MARÍA A. MARCELLINO
JIMENA CHILA COVACHINA
CAROLINA SGARBI; KARINA BERTONE
ARIEL YAPUR; MÓNICA RICCI

**LA EVOLUCIÓN
Y EL MÉTODO
CIENTÍFICO COMO
CIMENTOS
DE LA ENSEÑANZA
DE LA BIOLOGÍA**

MARÍA J. APODACA
LILIANA KATINAS
JORGE V. CRISCI

**MECANIZACIÓN DE LA
COSECHA DEL OLIVAR**

JACINTO DIAB
REINALDO LEUCI

**ECONOFÍSICA: LA FÍSICA
DE LOS MERCADOS
FINANCIEROS**

AURELIO FERNÁNDEZ BARIVIERA

**FÍSICA ESTADÍSTICA,
REDES NEURONALES
Y FREUD**

ROSELI S. WEDEMANN
ÁNGEL R. PLASTINO

**MOTORES
MOLECULARES**

CONSTANCIO M. ARIZMENDI

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit

Vicerrectora: Mg. Danya V. Tavela

Secretaria Académica: Abog. Ma. Florencia Castro

Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Mg. Silvina Sansarriq

Secretario de Extensión Universitaria: Lic. Juan P. Itoiz

Secretario General: Abog. Diego J. Batalla

Secretaria de Asuntos Económico-Financieros: Cdora. Mariela E. García

Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán

Directora Centro de Edición y Diseño: DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Guardasellos: Ing. Luis J. Lima

DIRECTOR DE LA REVISTA

Dr. Ángel L. Plastino

SUMARIO

#3 ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

**PÁG. 4 – FÍSICA ESTADÍSTICA,
REDES NEURONALES Y FREUD**

ROSELI S. WEDEMANN; ÁNGEL R. PLASTINO

**PÁG. 11 – DIVERSIDAD DE ESCARABAEIDOS
EN CINCO LOCALIDADES DEL NOROESTE
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

*MARÍA A. MARCELLINO; JIMENA CHILA COVACHINA; CAROLINA SGARBI;
KARINA BERTONE; ARIEL YAPUR; MÓNICA RICCI*

**PÁG. 18 – LA EVOLUCIÓN Y EL MÉTODO
CIENTÍFICO COMO CIMIENTOS
DE LA ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA**

MARÍA J. APODACA; LILIANA KATINAS; JORGE V. CRISCI

PÁG. 29 – MOTORES MOLECULARES

CONSTANCIO M. ARIZMENDI

**PÁG. 35 – MECANIZACIÓN DE LA COSECHA
DEL OLIVAR: ÚNICA ALTERNATIVA
ECONÓMICAMENTE SUSTENTABLE
EN LA PRODUCCIÓN DEL ACEITE DE OLIVA**

JACINTO DIAB; REINALDO LEUCI

**PÁG. 41 – ECONOFÍSICA:
LA FÍSICA DE LOS MERCADOS
FINANCIEROS**

AURELIO FERNÁNDEZ BARIVIERA

Edita



CEDI Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Callao 289 3.º piso, CP. 1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño
Coordinador: DCV Cristian Rava,
DCV Claudia Di Paola, DCV Bernabé Díaz

Corrector de estilo: Mariángel Mauri
Fotografía: DG Sofía Ginestra

Impresión
Buschi S.A.

Año 2 N.º 3
Marzo de 2016
Tirada 500 ejemplares
ISSN 2408-4492
Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

*Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDI
(cedi@unnoba.edu.ar)*

Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000
Tel 54 236 4407750
Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700
Tel 54 2477 409500.
Pergamino, prov. de Buenos Aires, Argentina

www.unnoba.edu.ar

EDITORIAL

Acercamos al amable lector el tercer número de la revista de divulgación NÚCLEOS, de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, en el que se abordan temas de naturaleza biológica, desde diversas perspectivas, con una interesante y muy importante temática.

María José Apodaca, Liliana Katinas y Jorge Crisci son investigadores del Museo de La Plata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, una institución científica señera de Argentina. Tratan aquí el concepto central de la biología, la evolución, desde un punto de vista novedoso e iluminador, relacionado con la enseñanza de esta ciencia.

Constancio Miguel Arizmendi nos entrega una descripción fascinante de los motores moleculares, que permiten el funcionamiento de las células biológicas y que, en poco tiempo más, a medida que vayamos entendiendo mejor sus mecanismos intrínsecos y la física subyacente, de modo que podamos controlarlos, transformarán nuestras capacidades tecnológicas de maneras que hoy son inimaginables.

Roseli Suzi Wedemann y Ángel Ricardo Plastino delimitan algunos aspectos de una de las fronteras de la investigación científica contemporánea: la descripción del cerebro en términos computacionales y de redes neuronales, y detallan algunos modelos tentativos que ofrecen promesas ciertas de que estamos comenzando a entender algunos de los problemas de la conciencia a partir de técnicas de la física.

Aurelio Fernández Bariviera nos acerca a una de las más interesantes nuevas disciplinas científicas que emergen en el siglo XXI: la llamada econofísica, que emplea técnicas de la física teórica para aplicarlas a todo tipo de problemas económicos. En este artículo se discuten tratamientos referentes a los mercados financieros.

M. A. Marcellino, J. Chila Covachina, C. A. Sgarbi, K. Bertone, A. Yapur y M. Ricci, desde la perspectiva de la transformación de ecosistemas naturales con fines productivos mediante prácticas agronómicas que influyan positivamente en la biodiversidad, relevan las especies de gusanos blancos en cinco localidades del noroeste bonaerense y determinan la diversidad y la especie dominante en sistemas de producción agrícola.

Finalmente, Jacinto Diab y Reinaldo Leuci, en una vena aplicada, describen algunos aspectos importantes sobre la mecanización de la cosecha de la oliva como alternativa tecnológica que posibilite que nuestro país mejore su situación en el mercado internacional de este producto.

Confiamos plenamente en que este abanico de problemáticas ha de suscitar el interés de nuestros lectores.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

FÍSICA, ESTADÍSTICA, REDES NEURONALES Y FREUD

Es ampliamente aceptado el hecho de que todos los fenómenos o estados mentales tienen un correlato en procesos físico-químicos en el cerebro que, en última instancia, están gobernados por las leyes de la física.^{1,2} La evidencia experimental en este sentido es creciente y abrumadora. El conocimiento a nivel experimental de la contraparte física de los procesos mentales se incrementa constantemente y se realizan descubrimientos a una velocidad vertiginosa. Como ejemplo podemos mencionar el notable efecto de la “neurona de Jennifer Aniston”. En un experimento realizado por investigadores del Instituto de Tecnología de California, se les mostró a pacientes epilépticos un gran número de fotografías y se descubrió que en los cerebros de estos pacientes había algunas neuronas individuales que se activaban al ver imágenes de determinados personajes.^{3,4} En un paciente, por ejemplo, había una neurona que reaccionaba exclusivamente ante imágenes de Bill Clinton. Otro paciente tenía una neurona que reaccionaba solo ante imágenes de Jennifer Aniston (esto no implica que, en general, haya una correspondencia uno-uno entre la respuesta de neuronas individuales y percepciones particulares). El experimento de “la neurona de Jennifer Aniston” pone de relieve la sofisticación que ha alcanzado la neurociencia experimental en la actualidad, puesto que permite en algunos casos monitorear la actividad de neuronas individuales en el cerebro.

SIGLO XXI: EL SIGLO DEL CEREBRO Y DE LA MENTE

El cerebro humano constituye el sistema físico más complejo que se conoce. Un rasgo notable del cerebro es su altísimo grado de conectividad: cada neurona del cerebro está, en promedio, conectada con otras 1000 neuronas. El grado de conectividad del cerebro es mucho mayor que el de las máquinas sofisticadas de construcción humana, como las computadoras. Comprender el funcionamiento del cerebro y la mente humanos constituye sin duda uno de los grandes desafíos de la ciencia contemporánea. El célebre investigador en neurociencia Eric Kandel, que recibió el Premio Nobel de Medicina y Fisiología en el 2000 por sus trabajos sobre la base fisiológica de la memoria,⁵ afirmó:

A medida que los biólogos le van dedicando una mayor atención al estudio del cerebro y la mente, se van convenciendo de que la mente será para la biología del siglo XXI lo que el gen fue para la biología del siglo XX. Como escribió François Jacob (1998), ‘el siglo que acaba se ha ocupado de los ácidos nucleicos y de las proteínas. El próximo siglo se concentrará en la memoria y en el deseo. ¿Será posible dar respuesta a las preguntas planteadas por estos fenómenos?’.⁶

Dentro de la cita de Kandel hay una cita de otro gran biólogo, François Jacob, quien obtuvo el Premio Nobel en 1965 (junto con Jacques Monod) por sus trabajos sobre los mecanismos genéticos de regulación de la síntesis de proteínas.⁷ Es curioso que, en concordancia con el contenido de esta cita, uno de los padres de la biología molecular, Francis Crick (descubridor, junto con James D. Watson, de la estructura molecular del ADN), dedicara la última parte de su carrera científica a la neurobiología, investigando el origen biológico de la conciencia.⁸ Estas anécdotas sobre Kandel, Jacob y Crick no le restan, evidentemente, importancia a

las otras ramas de la biología. En particular, la biología molecular, la genética y la teoría de la evolución son —y serán siempre— la base y el fundamento de toda investigación en biología (incluida la neurociencia). La cita de Kandel de algún modo refleja, sin embargo, el *Zeitgeist* de nuestro tiempo, con la prominencia que están adquiriendo los estudios en neurociencia.

El enorme flujo de datos generado por la neurociencia experimental crea la necesidad de nuevas técnicas, ideas y modelos teóricos para dar coherencia a esa masa de información. Dado que (como está ocurriendo en otras ramas de la biología) los datos experimentales en neurociencia son en gran medida de carácter cuantitativo, las nuevas herramientas teóricas para su estudio tienen que ser de naturaleza matemática, vinculadas a áreas como la ciencia de la computación, la física estadística y la teoría de los sistemas dinámicos. La ciencia actual todavía está lejos de haber desarrollado un modelo teórico realista para describir y entender la actividad cerebral humana en su globalidad. No obstante, el estudio teórico mediante modelos matemáticos de los procesos mentales es un área muy activa de investigación. Existen buenos modelos para describir circuitos neuronales y fenómenos mentales particulares. Estos modelos aún distan de reflejar en forma cabal la complejidad del cerebro y la actividad mental humanas. Su objetivo, mucho más modesto, es capturar algunas facetas parciales de los fenómenos mentales. En este artículo comentaremos una línea de investigación reciente, referida al modelado matemático de la interacción entre las actividades mentales consciente e inconsciente.

EL CEREBRO Y LAS REDES NEURONALES

En los trabajos que comentaremos en el presente artículo (en especial, en el siguiente apartado) el cerebro se representa mediante una red neuronal.⁹ Según esta concepción, el cerebro humano es un sistema cognitivo compuesto de neuronas interconectadas por medio de una red de sinapsis que cooperan para procesar información en una forma distribuida. Los estados mentales son entonces el resultado de la actividad global de las neuronas cerebrales. A partir de esta representación del cerebro como un sistema que procesa información de un modo paralelo y distribuido, se considera que la memoria humana está codificada en la arquitectura de la red neuronal cerebral. Esto implica que adquirimos nuevos recuerdos por medio de una reconfiguración de la estructura de nuestra red neuronal, es decir, por una reestructuración del conjunto de las conexiones sinápticas entre las neuronas que constituyen la red. Este proceso de reconfiguración constituye la base del proceso de aprendizaje. En los modelos matemáticos de redes neuronales que consideraremos aquí, cada neurona admite dos estados posibles que pueden representarse mediante los números +1 y -1, respectivamente. Es decir, el estado de una neurona dada, llamémosla “i”, está descrito por un número $S(i)$ que, como ya dijimos, admite dos valores posibles: +1 y -1. A las neuronas también las llamaremos “nodos” de la red. Dos neuronas dadas, denominémoslas “i” y “j”, pueden interactuar mediante una conexión sináptica cuya intensidad (peso) está caracterizada por un número $w(i,j)$. Esta cantidad representa la intensidad con que la actividad de la neurona i influye en la actividad de la neurona j. La conexión sináptica entre estas dos neuronas puede ser excitadora o inhibidora. Estas dos posibles situaciones corresponden, respectivamente, a que la cantidad $w(i,j)$ sea positiva o negativa. De este modo, la arquitectura de la red neuronal está descrita por el conjunto de todos los nodos (neuronas) y de todos los valores $w(i,j)$ que caracterizan a todas las conexiones sinápticas entre pares de neuronas en la red. El estado físico de la red en un cierto instante de tiempo está dado por el conjunto de los valores $S(i)$ que caracterizan los estados de cada una de las neuronas que constituyen el sistema. El estado de la red evoluciona en el tiempo de acuerdo con una ley dinámica que estipula cómo los estados de las neuronas en un instante dado determinan el estado de las neuronas en un instante posterior. Básicamente, cada neurona actualiza su estado de acuerdo con la suma (ponderada por los pesos sinápticos) de todos los estímulos (excitadores o inhibidores) que recibe de todas las neuronas con las que está vinculada a través de conexiones sinápticas. En los modelos neuronales de memoria se asume usualmente que la interacción entre un par de neuronas i y j es simétrica. Es decir que la intensidad con que la neurona i influye en la neurona j es la misma que la intensidad con que la neurona j influye en la neurona i. Esto corresponde a suponer que los números $w(i,j)$ satisfacen la condición $w(i,j) = w(j,i)$. Esta propiedad de simetría no es biológicamente realista. Las interacciones de las neuronas en el cerebro no son, en general, simétricas. La razón por la que se asume simetría en los modelos de redes neuronales es que, bajo esta condición, la dinámica de la red posee una serie de propiedades matemáticas “elegantes” que permiten la aplicación de técnicas de la física estadística para el análisis matemático de su comportamiento. Es importante resaltar que, aun limitándose al caso de redes simétricas, su dinámica es extremadamente rica y compleja. Por ende, son sin duda una herramienta conceptual poderosa para el análisis teórico de diversos fenómenos.

Asumiendo la condición de simetría arriba mencionada, es posible definir una cantidad, que denominaremos H, asociada al estado global de la red neuronal, que presenta propiedades matemáticas análogas a la energía en sistemas estudiados en física estadística. Esta “energía” H es una función matemática de los pesos sinápticos $w(i,j)$ y de los estados $S(i)$ de todas las neuronas de la red. Se puede demostrar que la regla de evolución del estado de la red es tal que la función H siempre decrece. Si uno pudiese graficar la dependencia

de H con los estados $S(i)$ de las neuronas, obtendría un paisaje energético (*energy landscape*) muy complejo, que presenta muchos mínimos locales. Este paisaje energético puede visualizarse o imaginarse como una superficie muy compleja con muchas montañas y valles. Si se deja evolucionar la red neuronal desde una condición inicial dada, evolucionará hasta alcanzar un cierto mínimo local del paisaje energético. Estos mínimos locales constituyen los estados estacionarios de la dinámica de la red. Esto es así en ausencia de ruido. Sin embargo, en una red neuronal real hay muchas perturbaciones (ruido) que le permiten a la red, con cierta probabilidad, escapar de un mínimo local y evolucionar hacia otro mínimo local. Este nuevo mínimo puede ser “mejor” que el anterior (en el sentido de corresponder a un valor aún menor que la cantidad H ; es decir, a un mínimo más profundo del paisaje energético). Las técnicas de la física estadística permiten estudiar este proceso mediante un método de cálculo numérico conocido como fraguado simulado (*simulated annealing*). Este método permite simular de forma eficiente el proceso dinámico mediante el cual la red evoluciona hacia un mínimo (razonablemente profundo) del paisaje energético. La implementación dinámica del proceso de *simulated annealing* también suele denominarse máquina de Boltzmann.

Los mínimos de la función H (mínimos del paisaje energético) constituyen los atractores de la evolución dinámica de la red y pueden interpretarse como las memorias almacenadas en la red neuronal. En otras palabras, si modelamos el cerebro como una red neuronal, nuestros recuerdos, o las cosas que hemos aprendido, están representados por estos mínimos del paisaje energético. Cuando un estímulo excita la red neuronal a un cierto estado global S , la red evolucionará hacia un nuevo estado S_m similar al estímulo original S , que es un mínimo del paisaje energético, y se estabilizará en él. Este mínimo corresponde a una memoria almacenada en la red que se asemeja al estímulo recibido. Este es el llamado mecanismo de memoria asociativa.

LAS REDES NEURONALES Y EL INCONSCIENTE

En Wedemann, Donangelo, De Carvalho y Martins (2002), Wedemann, Donangelo y De Carvalho (2008), Wedemann, Donangelo y De Carvalho (2009) Wedemann y De Carvalho (2012) se propone un modelo esquemático de red neuronal que representa algunos aspectos básicos de los procesos mentales vinculados a la existencia de contenidos de memoria a los que no tiene acceso la actividad mental consciente.^{10 11 12 13} Estos modelos neuronales describen la patología mental conocida como neurosis, que es modelada en términos de un proceso de memoria asociativa en el cerebro.

Freud observó que los pacientes neuróticos tienden sistemáticamente a repetir ciertos síntomas en forma de ideas y de impulsos. Según Freud, esta tendencia a la repetición de síntomas neuróticos está relacionada con memorias traumáticas reprimidas.¹⁴ La experiencia clínica en psicoanálisis indica que los pacientes con síntomas neuróticos severos pueden mejorar su condición a través de procesos en los que los pacientes logran adquirir conocimiento acerca de las causas de los mencionados síntomas, accediendo de este modo a memorias no conscientes. Uno de los objetivos del psicoanálisis (entre otros) es precisamente el de construir conocimiento consciente del material inconsciente reprimido.

En Wedemann et al. (2002), Wedemann et al. (2008), Wedemann et al. (2009) Wedemann y Carvalho (2012) se propone que la neurosis se manifiesta como un proceso de memoria asociativa. Como ya mencionamos, en este tipo de procesos una red neuronal genera un estado S_m (un mínimo local del paisaje energético) después de ser estimulada con un patrón (un estado inicial S) con una estructura suficientemente similar al estado S_m . En los modelos desarrollados en los trabajos que se mencionan arriba se considera que la red neuronal está dividida en dos subconjuntos débilmente conectados entre sí que representan, respectivamente, las partes conscientes e inconscientes de las memorias almacenadas en el sistema. Este esquema está asociado a la idea de que la represión de las memorias traumáticas corresponde a mecanismos que inhiben o debilitan la formación de ciertas conexiones sinápticas.¹⁵ La subred asociada al componente consciente corresponde a partes de la red responsables de la memoria simbólica, que puede ser expresada mediante símbolos o palabras. En estos modelos, los pesos $w(i,j)$ de las conexiones entre las neuronas se generan inicialmente mediante un algoritmo de auto-organización inspirado biológicamente. Las intensidades (pesos) iniciales de las conexiones neuronales entre las dos subredes anteriormente mencionadas se multiplican por un número menor que la unidad, a efectos de implementar la interacción inicial débil entre los subsistemas correspondientes a los componentes consciente e inconsciente. Una vez inicializada de este modo la arquitectura de la red, se determinan los contenidos de memoria guardados en ella. A estos efectos se le presentan a la red varios estados iniciales aleatorios y se la deja luego evolucionar de acuerdo con el proceso de *simulated annealing*. En distintas versiones del modelo se empleó la formulación estándar de la máquina de Boltzmann, basada en la termoestadística de Boltzmann-Gibbs, y una versión generalizada¹⁶ basada en q -entropías no-aditivas.^{17 18 19} La red evoluciona entonces hacia distintos mínimos locales del paisaje energético. Estos estados estables del sistema, correspondientes a los contenidos de memoria de una red neuronal formada por dos subredes débilmente conectadas, representan en estos

modelos los estados neuróticos. En Wedemann *et al.* (2002), Wedemann *et al.* (2008), Wedemann *et al.* (2009) Wedemann y De Carvalho (2012) se propone un mecanismo neuronal dinámico, correspondiente al proceso psicoanalítico de desarrollar conocimiento consciente de las memorias inconscientes reprimidas. En este proceso se estimula la red neuronal en su conjunto mediante el cambio del estado de uno de los nodos de la parte inconsciente de un patrón de memoria neurótico S_n almacenado en la red. Este nodo “i”, cuyo estado se cambia, es elegido al azar. Luego, mediante el protocolo de la máquina de Boltzmann, se deja evolucionar a la red a un nuevo estado estable S_e (un mínimo de la energía H) de toda la red. Si el patrón de la parte consciente del estado S_e es diferente del correspondiente a las neuronas de la parte consciente del estado neurótico original S_n , esto se interpreta como una nueva asociación consciente y se refuerzan las conexiones entre el nodo “i” inicialmente modificado y los nodos que cambiaron en la parte consciente.

La modificación inicial del nodo “i” representa un estímulo por parte del analista en el tratamiento psicoanalítico. Esto da lugar a aprendizaje cuando la estructura de la parte consciente del patrón generado por la máquina de Boltzmann difiere de los estados neuróticos inicialmente almacenados en la red. El proceso de aprendizaje aquí analizado está basado en la llamada regla de Hebb, ampliamente utilizada en el modelado de aprendizaje en redes neuronales. En el presente contexto, este aprendizaje representa el desarrollo de conocimiento consciente acerca del material inconsciente reprimido. Este proceso se repite varias veces y estas “iteraciones” gradualmente dan lugar a una nueva arquitectura de la red neuronal.

Estos modelos de la neurosis y de su tratamiento psicoanalítico, si bien son biológicamente plausibles y muestran un acuerdo cualitativo con los resultados de la experiencia clínica en psicoanálisis, son de carácter esquemático. En su presente estado de desarrollo, no permiten realizar predicciones o ser contrastados directamente con datos experimentales. Su propósito es conceptual. Estos modelos ilustran que es en principio posible —o concebible— proponer un mecanismo dinámico neuronal que reproduzca cualitativamente algunos rasgos básicos de la neurosis y de la conexión entre los procesos mentales conscientes e inconscientes. Es decir, estos desarrollos deben considerarse como una “prueba de concepto” (proof of principle) de que la formulación de modelos funcionales dinámicos de los procesos mentales anteriormente mencionados es factible. Estos trabajos constituyen un punto de partida en una posible línea a seguir en el marco de un área de investigación que aún permanece largamente inexplorada. Estas propuestas están también vinculadas al campo de investigación, emergente —y, de momento, especulativo—, de los modelos matemáticos del origen de la conciencia. Una breve revisión de algunos de los enfoques que han sido tratados en la literatura científica con respecto a este tema puede encontrarse en Wedemann y De Carvalho (2012).

MEGAMODELOS MATEMÁTICOS DEL CEREBRO

Hemos discutido algunos modelos matemáticos idealizados que, sin ser realistas, constituyen un primer paso tentativo hacia el modelado teórico de algunos aspectos de la interacción entre la actividad mental consciente y la inconsciente. Es oportuno hacer aquí un comentario sobre las perspectivas de implementar modelos matemáticos realistas del cerebro humano. De hecho, ha habido propuestas de este tipo de proyectos. Podemos mencionar el megaproyecto HBP (Human Brain Project) inicialmente promovido y liderado por el experto en neurociencias Henry Markram.²⁰ En una charla TED en 2009, Markram comenzó a defender públicamente la idea de elaborar un supermodelo matemático del cerebro humano que incorporara toda la información disponible acerca de la estructura del cerebro. Este proyecto permitiría realizar una simulación, empleando supercomputadoras, de los 86 000 millones de neuronas del cerebro y de los cien millones de millones de sinapsis que conectan a las neuronas entre sí. Esta megasimulación computacional del cerebro humano podría dar lugar a dramáticos avances en neurociencia, medicina, robótica y tecnología computacional. Este modelo del cerebro contribuiría a la comprensión de enfermedades como el mal de Alzheimer y ayudaría a descubrir nuevas drogas para tratar este y otros desórdenes. También brindaría información útil para desarrollar computadoras más veloces y robots con capacidades cognitivas, incluso con inteligencia. Más aun, el modelo HBP quizá echaría nueva luz sobre uno de los problemas abiertos más profundos de la ciencia contemporánea: el origen de la conciencia. El proyecto HBP finalmente fue aprobado por la Unión Europea a principios de 2013, con un presupuesto de más de mil millones de euros para un período de diez años. Lamentablemente, a dos años de su inicio, el proyecto se descarriló y se encuentra en crisis debido a problemas de mala gestión.²¹ Está ahora en proceso de reestructuración, concentrándose a partir de aquí en objetivos más modestos. En vez de apuntar a una supersimulación computacional para desentrañar los misterios del funcionamiento del cerebro y de la mente humanos, el proyecto se centrará en aspectos tecnológicos más concretos, vinculados al desarrollo de herramientas computacionales prácticas para la investigación en neurociencias. Estos acontecimientos son algo decepcionantes. Sin embargo, es probablemente solo cuestión de tiempo antes de que un nuevo proyecto que se proponga modelar el cerebro humano en su conjunto, como el concebido por el visionario Markram, sea llevado a cabo en algún lugar.

El proyecto HBP nos mueve a algunas consideraciones sobre el rol desempeñado por este tipo de supermodelos matemáticos. Los megamodelos matemáticos, con aspiraciones realistas, de fenómenos físicos, biológicos o sociales, presentan virtudes y también falencias. Las virtudes son claras: si el comportamiento del modelo se asemeja mucho al comportamiento del correspondiente sistema real, entonces, el modelo tiene un enorme valor práctico, ya que permite predecir el comportamiento del sistema real. En general, los modelos realistas no admiten solución analítica. Esto significa que las ecuaciones matemáticas que gobiernan la evolución del modelo no pueden resolverse en forma exacta mediante fórmulas matemáticas cerradas. En ese caso, para resolver las ecuaciones es preciso recurrir al cálculo numérico (usualmente masivo) mediante computadoras. Usualmente, es posible implementar la evolución del modelo en la computadora a una velocidad mucho mayor que la del sistema real en la naturaleza, lo cual permite realizar predicciones útiles. Un ejemplo concreto de esta situación es la predicción meteorológica. En el caso de un modelo global realista del cerebro humano, la velocidad de la correspondiente simulación por computadora será, probablemente, mucho menor que la velocidad a la que acontecen los procesos cerebrales reales. Sin embargo, tal simulación computacional sería de un inmenso valor práctico dado que permitiría la realización de experimentos (experimentos “in silico”) imposibles o extremadamente difíciles (o, aun siendo factibles, experimentos que en muchos casos serían inaceptables) de realizar sobre un cerebro humano vivo.

Más allá de su valor práctico, los megamodelos exitosos constituyen una evidencia fuerte de que los mecanismos básicos que se incluyeron en la formulación del modelo dan cuenta satisfactoriamente del comportamiento del sistema estudiado. Por ejemplo, en el caso de los modelos meteorológicos, el éxito en la predicción del tiempo indica que la física básica que se incluyó en el modelo (las leyes de la mecánica de fluidos, las leyes termodinámicas, etc.) da cuenta de los fenómenos meteorológicos. Es decir, los ingredientes básicos del modelo son correctos. En este sentido, un modelo realista exitoso sugiere que se tiene una comprensión satisfactoria de los mecanismos elementales subyacentes al fenómeno considerado. Por el contrario, si un megamodelo que aspira a ser una descripción realista de un fenómeno muestra un comportamiento que sistemáticamente difiere de lo observado en la naturaleza, ello indica que hay alguna deficiencia seria en la comprensión de los mecanismos básicos relevantes.

Las consideraciones hechas más arriba señalan que, en un sentido bastante evidente, el éxito de un modelo matemático realista indica que se comprenden bien los mecanismos básicos que dan cuenta del fenómeno investigado. Sin embargo, existe otro sentido, quizá menos obvio, en que el aporte a la comprensión de un fenómeno natural, dado por un megamodelo realista, presenta deficiencias. Es oportuno recordar aquí una frase usualmente atribuida a Steven Weinberg (premio Nobel de Física, 1979). Cuando le mostraron a Weinberg resultados obtenidos mediante un vasto modelo computacional que coincidían muy bien con los datos experimentales, Weinberg dijo: “Muy bien, la computadora entendió el problema. Ahora quisiera entenderlo yo”. Como ya dijimos, este tipo de modelos suele basarse en cálculos numéricos masivos hechos con computadoras. Los cálculos numéricos involucrados son tantos y tan intrincados que el comportamiento del modelo se vuelve casi tan difícil de entender como el comportamiento del sistema real. En efecto, esta es la base de una de las principales críticas esgrimidas en contra del proyecto HBP. Muchos expertos en neurociencias afirman que, aunque se consiguiese simular con éxito, en una supercomputadora, el comportamiento de cada una de las neuronas del cerebro, esto no contribuiría en nada a entender el origen y el funcionamiento de las capacidades cognitivas, de la memoria o de las emociones. Hay algo de válido en esta crítica. Sin embargo, un modelo de este tipo constituiría, sin duda, una valiosa herramienta para explorar el comportamiento del cerebro. Pero poner a punto esa herramienta sería solo el primer paso. Se necesitaría todavía desarrollar todo tipo de nuevas ideas, herramientas y técnicas teóricas (incluyendo modelos más sencillos) para conseguir entender e interpretar el comportamiento de la megasimulación.

La problemática que presentan los megamodelos computacionales tiene cierta similitud con el tema planteado por Borges en su cuento “Del rigor en la ciencia”. Escribe Borges:

En aquel imperio, el arte de la cartografía logró tal perfección que el mapa de una sola provincia ocupaba toda una ciudad, y el mapa del imperio, toda una provincia. Con el tiempo, estos mapas desmesurados no satisficieron y los colegios de cartógrafos levantaron un mapa del imperio, que tenía el tamaño del imperio y coincidía puntualmente con él.²²

Borges escribió este texto en una época anterior al desarrollo de la moderna tecnología informática. Hoy, la información contenida en los “mapas desmesurados” puede almacenarse electrónicamente en formato digital, lo que permite acceder y procesar esa información en forma rápida y eficiente. Esto transforma el descomunal mapa en un compendio de datos muy útil. Pero “digerir” esos datos y entenderlos globalmente es otra cuestión. Los modelos matemáticos son como los mapas. Un modelo sencillo, pero bien planteado, como un mapa pequeño, permite esclarecer algunos aspectos esenciales del fenómeno estudiado. Un megamodelo (como los mapas desmesurados del cuento) contiene una enorme cantidad de información, sin

duda muy valiosa, pero de difícil interpretación. Otra metáfora útil, a efectos ilustrativos, es quizá la de una caricatura. Un buen caricaturista consigue, mediante unos cuantos trazos, representar lo esencial de un rostro. De forma similar, un buen modelo matemático idealizado logra capturar de forma económica aspectos esenciales de un fenómeno natural.

COMENTARIOS FINALES

Hemos comentado algunos aspectos de los modelos matemáticos de los procesos mentales. El trabajo de investigación en este tema es netamente multidisciplinario e involucra los aportes, entre otros, de biólogos, psicólogos, físicos, matemáticos y expertos en ciencias computacionales.

Existe todo un espectro de niveles de complejidad y de “realismo” en estos modelos. Las distintas clases de modelos cumplen roles diferentes y complementarios. Los megamodelos realistas, si son exitosos, son de gran utilidad práctica, pues permiten predecir el comportamiento de sistemas naturales complejos. El ejemplo paradigmático de este tipo de modelos lo constituyen los modelos de los fenómenos meteorológicos. Los megamodelos realistas, cuando dan resultados que concuerdan con lo que se observa en la naturaleza, son evidentemente de gran importancia en relación con los fundamentos de la ciencia, pues indican que la comprensión de los mecanismos fundamentales subyacentes al fenómeno estudiado es correcta. En el caso del cerebro humano y de los fenómenos mentales, aún no han sido desarrollados megamodelos realistas. Hubo un intento reciente en este sentido, el proyecto HBP, que lamentablemente no dio los frutos inicialmente esperados. Sin embargo, posiblemente es solo cuestión de tiempo antes de que se vuelva a hacer un nuevo intento en esa dirección.

Los megamodelos computacionales, aun en el caso de que sean exitosos, no son necesariamente suficientes para alcanzar una comprensión profunda de los fenómenos estudiados. Modelos más simples, idealizados, o esquemáticos, pueden capturar algunos aspectos esenciales de los procesos bajo consideración y contribuir a su esclarecimiento.²³

Suele decirse que una de las dificultades a las que se enfrenta el estudio multidisciplinario de los sistemas complejos en biología y en ciencias sociales es la ausencia de un lenguaje común a las distintas ciencias que permita que los científicos provenientes de distintas disciplinas puedan comunicarse entre sí. En realidad, una componente esencial de ese lenguaje común ya existe desde hace más de dos mil años, y está dada por las matemáticas. Estas contribuyen, mediante la construcción de modelos apropiados, a la comprensión de los intrincados sistemas y procesos que se observan en la naturaleza (incluida la naturaleza humana).²⁴ Esta idea ya fue, en cierto modo, sugerida por Platón. En el dintel de la puerta de la Academia decía: “Que nadie entre aquí si no sabe geometría”. Hoy, las ecuaciones diferenciales, la teoría de probabilidades y la teoría de la información son algunos de los principales ingredientes de la *lingua franca* que permite a los científicos de áreas diversas comunicarse entre sí. Y, si no lo son, pronto lo serán.

NOTAS:

1. Kandel, E. R., Schwartz, J. H. y Jessell, T. M. (2000). *Principles of Neural Science*. Mac Graw-Hill.
2. Una magnífica y accesible introducción a la fisiología neuronal y a sus bases físico-químicas puede encontrarse en Uchitel, O. D. (2015). *Qué son las neuronas*. Buenos Aires: Paidós.
3. Quian Quiroga, R., Reddy, L., Kreiman, G., Koch, C. y Fried, I. (2005) “Invariant Visual Representation by Single Neurons in the Human Brain”, *Nature*, 435, 1102-1107.
4. Una discusión fascinante de estos experimentos y otros desarrollos en neurociencia, en particular vinculados a la memoria humana, puede encontrarse en Quian Quiroga, R. (2011). *Borges y la memoria: Un viaje por el cerebro humano de “Funes el memorioso” a la neurona de Jennifer Aniston*. Buenos Aires: Sudamericana.
5. Kandel, E. R. (2007). *In Search of Memory: The Emergence of a New Science of Mind*. W. W. Norton.
6. Kandel, E. R. (2006). “Biology and the Future of Psychoanalysis: A New Intellectual Framework for Psychiatry Revisited”, en E. R. Kandel, *Psychiatry, Psychoanalysis, and the new Biology of the Mind*. La traducción es nuestra.
7. Jacob, F. (1998). *Of Flies, Mice and Men*. Harvard University Press.
8. Crick, F. (1994). *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*. Nueva York: Charles Scribner’s Sons.
9. Hertz, J.A., Krogh, A. y Palmer, R.G. (1991). “Introduction to the Theory of Neural Computation”, Lecture Notes Vol. 1, Santa Fe Institute, Studies in the Science of Complexity.

10. Wedemann, R. S., Donangelo, R., De Carvalho, L. A. V. y Martins, I. H. (2002). "Memory Functioning in Psychopathology", en P. M. A. Soot. (Ed.). *Lecture Notes in Computer Science*, 2329. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 236–245.
11. Wedemann, R. S., De Carvalho, L. A. V. y Donangelo, R. (2008). "Network Properties of a Model for Conscious and Unconscious Mental processes", *Neurocomputing*, 71, 3367-3371.
12. Wedemann, R. S., Donangelo, R. y De Carvalho, L. A. V. (2009). "Generalized Memory Associativity in a Network Model for the Neuroses", *Chaos*, 19(1):015116.
13. Wedemann, R. S. y De Carvalho, L. A. V. (2012). "Some Things Psychopathologies Can Tell Us About Consciousness", en A. E. P. Villa et al. (Eds.) *Artificial Neural Networks and Machine Learning. ICANN 2012*, 379-386, Springer-Verlag.
14. Freud, S. (1966). "Introductory Lectures in Psycho-Analysis". Nueva York y Londres, W. W. Norton and Company. Edición original en alemán de 1917.
15. Wedemann, R. S., Donangelo, R. y De Carvalho, L. A. V., *op. cit.* supra, nota 12.
16. *Ibid.*
17. Tsallis, C. y Stariolo, D. (1996). "Generalized Simulated Annealing", *Physica A*, 233, 395-406.
18. Tsallis, C. (2009). *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics: Approaching a Complex World*. Nueva York: Springer.
19. Tsallis, C. y Plastino, A. R. (2012). "Complejidad y la entropía no-aditiva S_q ", *Revista Española de Física*, 26(3), 70-75.
20. Theil, S. (2015). "Why the Human Brain Project Went Wrong-and How to Fix It", *Scientific American*, 313(4).
21. *Ibid.*
22. Borges, J. L. (1960). "Del rigor en la ciencia", en J. L. Borges, *El hacedor*. Buenos Aires: Emecé.
23. Plastino, A. R. (2014). "De las leyes de Newton a la guerra de Troya", *Núcleos*, 1, 34-39.
24. *Ibid.*

Roseli Suzi Wedemann es profesora e investigadora de la Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doctora en Ingeniería de Sistemas y Computación por la Universidade Federal do Rio de Janeiro, su trabajo de investigación se centra en modelos computacionales en neurociencia. Ha sido investigadora visitante en el Imperial College London (Inglaterra), en la Universidad Nacional de La Plata y en la Universidad de Pretoria (Sudáfrica). Actualmente es coordinadora del Programa de Posgrado en Ciencias Computacionales del Instituto de Matemáticas y Estadística de la UERJ.

Ángel Ricardo Plastino es profesor de la UNNOBA e investigador del CONICET. Es doctor en Astronomía por la Universidad Nacional de la Plata. Ha desarrollado trabajos de investigación en astronomía dinámica, en física estadística y en física de la información y sus aplicaciones multidisciplinarias.

M. A. MARCELLINO
J. CHILA COVACHINA
C. SGARBI
K. BERTONE
A. YAPUR
M. RICCI

DIVERSIDAD DE ESCARABAEIDOS EN CINCO LOCALIDADES DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

INTRODUCCIÓN

La diversidad de insectos es un elemento fundamental para el desarrollo de planes de conservación y uso sustentable de los recursos naturales. Por lo tanto, su conocimiento, cuantificación y análisis es fundamental para entender el mundo natural y los cambios inducidos por la actividad humana (Villareal *et al.*, 2006), siendo la riqueza de especies el primer aspecto que debe considerarse al afrontar estudios sobre la misma (Piarfon, 2005).

El suelo es un sistema en el que la mayoría de sus propiedades físicas y químicas, así como los procesos que ocurren, son mediados por la biota que lo habita (Zerbino Bardier, 2005). Entre sus miembros se encuentran los termites, lombrices de tierra, escarabajos, arañas, larvas de moscas y mariposas, caracoles, milpiés, ciempiés y hormigas entre otros (Brown *et al.*, 2001). Los escarabajos (Coleoptera: Scarabaeidae) han demostrado ser bioindicadores de utilidad por su gran diversidad y sensibilidad a las condiciones ambientales, por lo que proporcionan una visión detallada del cambio ecológico (Orgeas y Andersen, 2001).

Según los estudios realizados por Alvarado (1980), en la región pampeana, los Scarabaeidae se encuentran representados por nueve especies incluidas en tres subfamilias (Dynastinae, Rutelinae y Melolonthinae) como: *Diloboderus abderus* Sturm, *Botynus striatellus* Farmaire, *Archophileurus vervex* Burmeister; *Cyclocephala signaticollis* Burmeister; *C. putrida* Burmeister y *C. modesta* Burmeister (Dynastinae); *Heterogeniates bonariensis* Chaus y *Anomala testaceipennis* Blanchard (Rutelinae) y *Philochloenia bonariensis* Bruch (Melolonthinae).

Sus larvas corresponden al tipo denominado “escarabeiforme”. La cabeza está bien diferenciada, pigmentada de color pardo y notablemente esclerosada. El cuerpo, de color blanco a blanco amarillento, está cubierto de numerosas setas que le dan un reflejo rojizo; es curvo, en forma de “C” y consta de trece segmentos: los tres primeros corresponden al tórax y llevan en cada uno un par de patas ambulatorias. Los diez restantes, sin apéndices locomotores, pertenecen al abdomen (Alvarado, 1980). Se alimentan preferentemente de las raíces de gramíneas y de restos vegetales en superficie, aunque no todos los gusanos blancos causan daños a los cultivos, ya que un grupo de especies, como los escarabajos estercoleros, se han especializado en la descomposición de las heces de vertebrados, lo cual ejerce una importante función en la incorporación de materia orgánica al suelo. Los adultos presentan diferentes regímenes alimentarios, algunos se alimentan de materia orgánica en descomposición, mientras que otros actúan como defoliosadores de árboles (Frana y Imwinkelried, 1996).

Diloboderus abderus o “bicho torito” es considerada la especie más perjudicial por su frecuencia, abundancia y la voracidad del último estadio larval (Zerbino Bardier, 2002). Sin embargo, las pérdidas debidas a estos insectos comienzan desde la implantación de los cultivos, por cuanto también hacen de la semilla su alimento (Alvarado, 1980). Los adultos aparecen en diciembre e inician la actividad reproductiva; las hembras colocan los huevos durante enero, febrero y marzo en galerías que cavan en el suelo entre restos vegetales. Manifiestan una marcada preferencia por oviponer en suelos no removidos, beneficiándose así con la siembra directa (Fava *et. al.*, 2004; Ratcliffe, 1991).

El género *Cyclocephala* es considerado el más diverso dentro de la subfamilia Dynastinae, con aproximadamente 335 especies descritas (Ratcliffe, 2008; Ratcliffe y Cave, 2006; Mondaca, 2011). Algunas especies alcanzan importancia económica puesto que sus larvas (presentes desde enero a noviembre) atacan el sistema radical de una amplia gama de cultivos agrícolas, a veces en asociación con otros géneros como *Anomala*, *Archophileurus*, *Diloboderus*, *Heterogeniatus*, *Phylochloenia* y *Phyllophaga*, etc. En nuestro país ha sido reportada como parte del complejo de gusanos blancos que atacan al cultivo de trigo (Mondaca, 2011). Presenta un ciclo de vida anual. Se la considera polifítófaga y se la encuentra tanto en sistemas agrícolas como en pasturas. No obstante esto, estas larvas no alcanzan el carácter de plagas (Alvarado, 1980).

Otra de las especies cuyo ciclo fue caracterizado es *P. bonariensis*, que presenta cuatro estadios larvales y su ciclo de vida dura más de un año, por lo que existe superposición de estadios larvales y de generaciones. Esto podría atribuirle ventajas a la especie frente a los factores de mortalidad natural, lo cual le otorgaría una mayor supervivencia y perpetuación de la especie (Bertone, 2011).

Las prácticas de manejo asociadas a la menor remoción del suelo han aumentado la incidencia de gusanos blancos, entre otras plagas (Aragón y Flores, 2005). El tipo y el grado de labranza afectan a los artrópodos que viven en suelo, principalmente a través de tres mecanismos: (1) el grado de disturbio mecánico, (2) la cantidad, calidad y ubicación de los residuos del cultivo anterior en el perfil del suelo y (3) la variación en la composición de las comunidades y en la densidad de las poblaciones de malezas (Lietti *et al.*, 2008).

El complejo de gusanos blancos es uno de los grupos de insectos más relacionados con la siembra directa, pues al no perturbarse el hábitat aumentaría la tasa neta de crecimiento de sus poblaciones a través de los años. Sin embargo, no todos los lotes de siembra directa tienen problemas con esta plaga. Por este motivo, antes de adoptar cualquier medida de control es imperioso efectuar muestreos para poder cuantificar la densidad de *D. abderus* y separarlos del resto de especies mediante una correcta identificación (Alvarado, 1979).

Por otro lado, poblaciones de gusanos blancos de abundancia moderada son consideradas de gran utilidad en siembra directa puesto que reciclan nutrientes y facilitan la aireación e infiltración del agua en suelos compactados. Por tal motivo, además de la correcta identificación de las especies, es fundamental determinar, mediante una técnica de monitoreo adecuada, su densidad poblacional (Aragón, 2002).

Teniendo como premisa que la transformación de los ecosistemas naturales con fines productivos y su manejo a través de distintas prácticas agronómicas, influyen en la biodiversidad de los escarabeidos en términos de riqueza, abundancia y dominancia de especies, los objetivos del presente estudio fueron: relevar las especies de gusanos blancos en cinco localidades del noroeste bonaerense y determinar la diversidad medida en términos de riqueza y abundancia, como así también la especie dominante, en función de las estrategias de manejo en los sistemas de producción considerados.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. ÁREA DE ESTUDIO

Los monitoreos se realizaron en cinco localidades situadas al noroeste de la provincia de Buenos Aires: El Triunfo, partido de Lincoln (35°06' LS; 61°31' LO); Arribeños, partido de General Arenales (34°13' LS; 61°22' LO); General Pinto, partido de General Pinto (34°39' LS; 61°48' LO); Baigorrita (34°45' LS; 60°59' LO) y Agustín Roca (34°32' LS; 60°55' LO), partido de Junín. En cada localidad se seleccionaron los lotes según su actividad agrícola o mixta (Tabla 1).

Con el objetivo de unificar el criterio de las distintas actividades en las localidades evaluadas, se denominó “lote agrícola” al que realizó agricultura continua y “lote mixto” al que incluyó pasturas dentro de la secuencia de cultivos, debido a una actividad agrícola-ganadera y a la presencia de vacunos en el lote por algún período de tiempo.

Tabla 1. Características de los sitios analizados

Localidad	Serie de suelo	Lote agrícola	Lote mixto
EL TRIUNFO	Hapludol Típico		Pastura alfalfa 3° año/antecesor soja
BAIGORRITA	Hapludol Típico	Secuencia de cultivo: trigo/cebada, soja, maíz	
AGUSTÍN ROCA	Hapludol Típico	Secuencia de cultivos: cebada/girasol, maíz, trigo/soja	
ARRIBEÑOS	Hapludol Típico, Argiudol Oxyacuico	Soja de 1°, antecesor gramínea.	Lote 2: soja 1ª con antecesor pasturas. Lote3: pastura de alfalfa
GENERAL PINTOS		Trigo, secuencia antecesora: maíz/soja-soja, trigo	Pastura consociada: festuca, trébol blanco, <i>Lotus tenuis</i> .

2. MONITOREO

En cada localidad se realizó un monitoreo mensual durante doce meses en el año 2012. Se muestrearon diez hectáreas en cada lote seleccionado (mixto o agrícola) y se tomó una muestra por hectárea de manera totalmente aleatorizada según la técnica propuesta por Frana y Imwinkelried (1996).

Las larvas encontradas se colocaron en bandejas plásticas con tapa, y su correspondiente rótulo, en las cuales se incluyó tierra y rastrojos que permitieran la subsistencia de los gusanos blancos (GB) hasta la posterior identificación en el Gabinete de Entomología (Junín, UNNOBA). Para la identificación de las especies se utilizó la clave de identificación de larvas de Alvarado (1980) y la modificada por Frana (2003), con la ayuda de un microscopio estereoscópico de 20-40X marca AHECRO modelo GTX – 7CW de 20-40X.

Para determinar la diversidad de especies se utilizó el índice de Shannon-Wiener (H') (Begon *et al.*, 1995; Moreno, 2001) que contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies) y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia). La dominancia general se calculó a través del índice de Berger-Parker (Berger y Parker, 1970; May, 1975) con el fin de obtener la proporción de las especies más abundantes.

El índice de diversidad de Shannon se calcula como:

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

Donde:

S – número de especies o riqueza de especies.

p_i – proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos (es decir la abundancia relativa de la especie i): $\frac{n_i}{N}$

n_i – número de individuos de la especie i

N – número de todos los individuos de todas las especies.

Con el objetivo de estimar la proporción de las especies más abundantes se calculó el índice de dominancia general de Berger-Parker (Berger y Parker, 1970; May, 1975)

La diversidad beta expresa el grado de semejanza en composición de especies y sus abundancias en dos muestras (comunidades). Uno de los métodos cuantitativos corresponde al índice de Sørensen (Czekanovski-Dice-Sørensen) (Magurran, 1988) que expresa:

$$I_s = 2C / (A+B)$$

Donde:

C: número de especies compartidas para las dos muestras

A y B: número de especies de las comunidades A y B, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 304 individuos de GB pertenecientes a siete especies: *P. bonariensis* (42,7%), *C. modesta* (28,6%), *D. abderus* (10%), *C. putrida* (8,5%), *A. testaceipennis* (5%), *C. signaticollis* (3,6%) y *H. bonariensis* (1,6%). De las nueve especies descritas por Alvarado (1980) para la región pampeana, en ninguna de las localidades monitoreadas se halló a *B. striatellus* ni a *A. vervex*, ni fue la especie dominante *D. abderus* como puede observarse en Tabla 2. Además, se encontraron variaciones en la composición y número de especies en las distintas localidades en estudio. La mayor abundancia de larvas se registró en la localidad de A. Roca (77), seguida por Arribeños (65), General Pinto (60), Baigorrita (53) y El Triunfo (49) (Tabla 2). Si bien *D. abderus* es la tercera especie en abundancia, fue encontrada únicamente en la localidad de Junín. Esto podría atribuirse a la distribución espacial de tipo agregada que poseen las larvas de escarabeados. Por otro lado, *Philochloenia bonariensis*, como puede observarse en Tabla 2, además de ser la especie dominante, estuvo presente en las cinco localidades, destacándose Arribeños, en la cual fue la única especie presente. De manera similar, en General Pinto *C. modesta* presentó un claro predominio. En el resto de las localidades se observó mayor riqueza de especies con abundancias más repartidas entre ellas (Tabla 2; Figura 1).

Con relación a las especies reportadas para la región pampeana por Iannone (2006, 2012), quien cita *P. bonariensis*, *C. signaticollis* y *D. abderus* como las especies más frecuentes, los resultados obtenidos en el presente estudio son parcialmente coincidentes, dado que se observaron diferencias en la abundancia de *C. signaticollis*, especie que fue encontrada en baja frecuencia, con un 3,6% del total de larvas identificadas.

Por otro lado, también se encontraron diferencias con los resultados obtenidos por Frana (2002) y Bonivardo *et al.* (2013), quienes encontraron que *D. abderus* y *A. testaceipennis* son dos de las especies que muestran mayor abundancia en Argentina, mientras que en el presente estudio fueron halladas con una frecuencia del 10 y 5%, respectivamente.

El índice de diversidad total para la región bajo estudio fue de $H' = 1,50$ y el índice de dominancia $d_{P. bonariensis} = 0,43$. Al discriminar por localidad, la mayor diversidad se halló en Baigorrita ($H' = 1,72$), seguida de Agustín Roca y El Triunfo. En las localidades de General Pinto y Arribeños el valor de Shannon-Wiener correspondió a valores cercanos a cero, debido a la dominancia de una sola especie, *C. modesta* y *P. bonariensis*, respectivamente (Figura 1).

Con relación a la diversidad de GB en cada tipo de actividad, se alcanzó valores de $H' = 1,67$ en los sistemas agrícolas y de 0,86 en los mixtos. Ambas cifras demuestran una clara diferencia de riqueza y abundancia de especies. En los lotes con predominancia de pasturas, la riqueza representada por cinco especies asigna valores de abundancia elevados para solo dos de ellas, en tanto que en el resto son mínimos. En cuanto a los lotes netamente agrícolas, se registraron siete especies integrantes del complejo de GB, con una distribución poblacional más homogénea. No obstante, la predominancia de *P. bonariensis* y *C. modesta* coincide en ambos sistemas de producción. Esto contrasta con lo expuesto por Bonivardo *et al.* (2013), quienes hallaron que la riqueza de especies en San Luis fue mayor en el pastizal natural, observando mayor abundancia de *C. putrida*, seguida por *A. testaceipennis* en lotes de pastizal natural y pastura implantada con pasto llorón (*Eragrostis curvula* (Schrader) Nees, Poaceae), mientras que en el lote agrícola la especie más abundante fue *P. bonariensis*. Las especies de la familia Scarabaeidae responden de manera directa a la estructura de las comunidades existentes en un hábitat, presentándose relaciones de especialización a un determinado tipo de recurso (Davis *et al.*, 2001) (Figura 2).

Se considera que, en general, los sistemas con labranza reducida o sin labranza presentan mayor abundancia y diversidad de artrópodos que los convencionales. Sin embargo, esta tendencia varía con la época del año, la antigüedad del sistema, la secuencia de cultivos y con el grupo de artrópodos considerado (Lietti *et al.*, 2008). En este sentido, Iannone (2006) determinó que la cantidad de GB se incrementa en una relación aproximada de tres a cuatro veces al pasar del sistema de labranza convencional a una siembra directa de tres o más años, y a su vez, de esta a las pasturas perennes. En el presente estudio, los lotes mixtos analizados corresponden a pasturas de menos de cinco años de implantación, con lo cual la poca antigüedad de las mismas puede ser un factor determinante en la menor riqueza y abundancia de las especies identificadas.

Tabla 2. Abundancia de especies de escarabeidos en el noroeste de la provincia de Buenos Aires.

Especie	Arribeños	Baigorrita	El Triunfo	Gral. Pinto	A. Roca	Frecuencia absoluta y relativa
<i>P. bonariensis</i>	65	5	24	1	35	130 (42,7%)
<i>C. modesta</i>	0	7	17	58	5	87 (28,6%)
<i>D. abderus</i>	0	2	0	0	28	30 (10%)
<i>C. pútrida</i>	0	18	6	0	2	26 (8,5%)
<i>A. testaceipennis</i>	0	10	0	1	4	15 (5%)
<i>C. signaticollis</i>	0	9	2	0	0	11 (3,6%)
<i>H. bonariensis</i>	0	2	0	0	3	5 (1,6%)
Subtotal	65	53	49	60	77	304

Figura 1. Abundancia y diversidad de especies de gusanos blancos halladas por localidad.

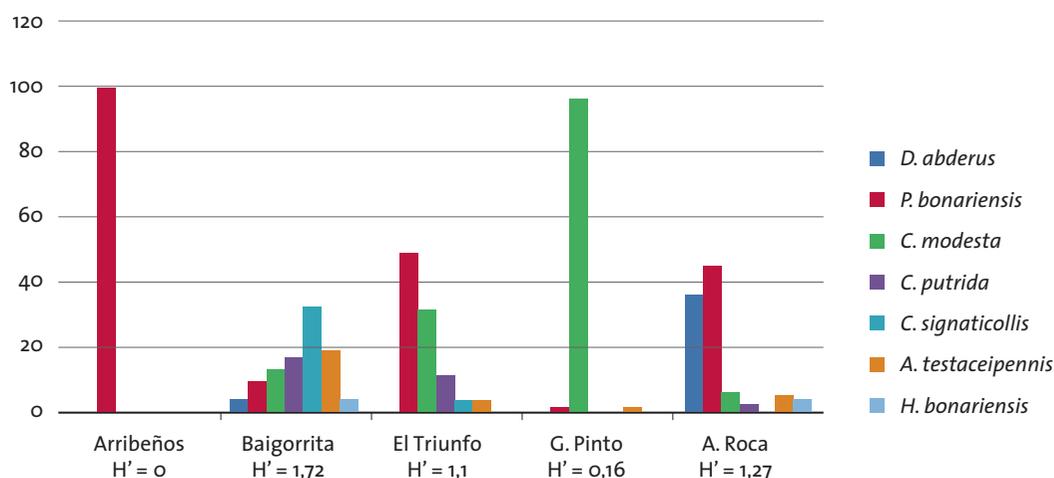
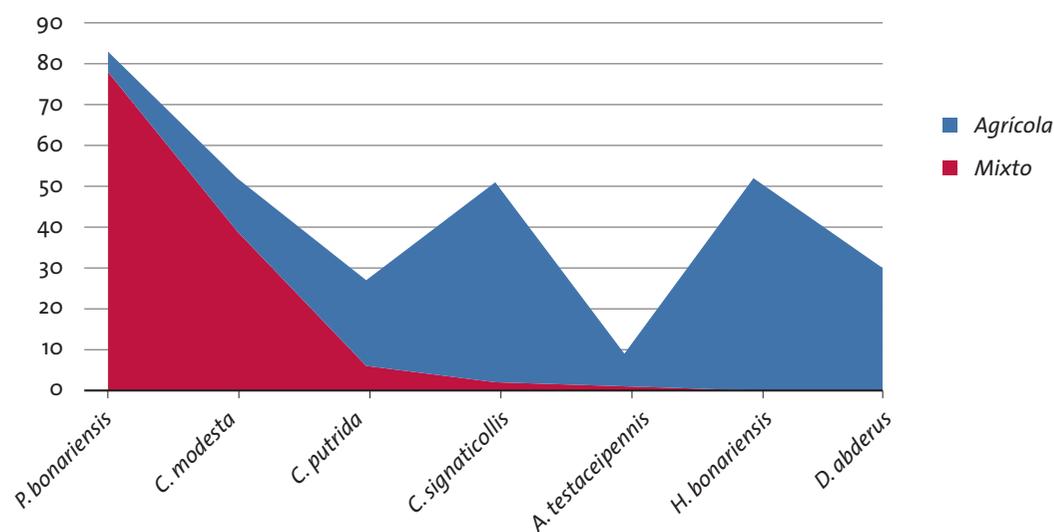


Figura 2. Especies de escarabeidos por sistema de producción.



CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se concluye que:

- La diversidad general de larvas de Scarabeidae encontrada fue baja, con diferencias importantes en la composición o riqueza de especies en las distintas localidades relevadas. Si bien la diversidad fue mayor en suelos agrícolas que en los mixtos, en ambos sistemas productivos las especies más abundantes fueron *P. bonariensis* y *C. modesta*.
- Las diferencias entre ambos sistemas productivos podrían deberse a que en los sistemas mixtos las pasturas relevadas tenían una antigüedad menor a los cinco años, mientras que los suelos agrícolas presentaron mayor cantidad de tiempo sin remoción de suelo, factor que incrementaría la diversidad de larvas de gusanos blancos.

- De acuerdo a las especies mayoritariamente encontradas en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, estas no representan una amenaza para el rendimiento potencial de los cultivos; al contrario, su presencia favorecería ciertas propiedades edáficas, como una mayor aireación debido a la formación de galerías y a la incorporación de materia orgánica al perfil del suelo como resultado de la degradación de residuos.

REFERENCIAS

- Alvarado, L. (1979). "Comparación poblacional de "gusanos blancos" (larvas de Coleopteros Scarabaeidae) en tres situaciones de manejo". *INTA-Generalidades, Carpeta de Producción Vegetal*, tomo II, Inf. 16, pp. 1-5.
- Alvarado, L. (1980). *Sistemática y bionomía de coleópteros que en estados inmaduros viven en el suelo*. (Tesis doctoral N°. 386). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- Aragón, J. (2002). "Guía para el reconocimiento y manejo de plagas tempranas relacionadas a la siembra directa". *Agroedificiones INTA*. SAGP y A, pp. 14-15.
- Aragón, J. y Flores, F. (2005). "Insectos de suelo perjudiciales para el maíz: Alternativas de manejo". Sección Entomología Área Suelos y Producción Vegetal. INTA Marcos Juárez, pp. 1-6.
- Begon, M.; Harper J. y Townsend, C. (1995). *Ecología: individuos, poblaciones y comunidades*. Barcelona: Ed. Omega.
- Berger, W.H. y Parker, F. L. (1970). "Diversity of plank tonic forminifera in deep-sea sediments". *Science*, 168(3937), pp. 1345-7.
- Bertone, K. (2011). *Scarabeidos presentes en Arribeños, provincia de Buenos Aires: Determinación de la diversidad y especies dominantes*. Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Fecha defensa: 4/3/11.
- Bonivardo, S.L.; Martínez, A.N. y Funes, M.B. (2013). "Determinación de especies de gusanos blancos (Coleoptera: Scarabaeidae) presentes en lotes de pastizal natural, pasto llorón y cultivados de la provincia de San Luis". *Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 22, serie supl. 2. Congreso de Pastizales. Santa Rosa, Argentina.
- Brown, G.G.; Fragoso, C.; Barois, I.; Rojas, P.; Patron, J.C.; Bueno, J.; Moreno, A. G.; Lavelle, P.; Ordaz, V.; Rodriguez, C. (2001). "Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos". *Acta Zoológica Mexicana*, 1, pp. 79-110.
- Davis, A.J.; Holloway, J.D.; Huijbregts, H.; Krikken, J.; Kirk-Springgs, A.H. y Sutton, S.L. (2001). "Dung beetles as indicators of change in the forests of northern Borneo". *Journal of Applied Ecology*, 38, pp. 593-616.
- Fava F.D. y Imwinkelried J.M. (2004). "gusano blanco (*Diloboderus abderus*) en trigo". Boletín n.º 4, Ediciones INTA, Proyecto regional de agricultura sustentable.
- Frana, J.E. y Imwinkelried, J.M. (1996). "El complejo de gusanos blancos en trigo". INTA, Publicación Miscelánea n.º 74. Trigo. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela.
- Frana J. E. (2002). "El cultivo de trigo y los gusanos blancos". Información técnica de trigo. Campaña 2002. n.º. 12. Área de Investigación en Agronomía. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela.
- Frana, J. E. (2003). "Control de gusanos blancos en trigo mediante insecticidas aplicados a la semilla". Información técnica de trigo, campaña 2003. INTA, Publicación Miscelánea n.º 99. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela.
- Iannone, N. (2006). Manejo de Gusanos Blancos. Seminario Manejo de Plagas 2006. Hotel Sheraton. Córdoba. Argentina. Recuperado de: <http://produccion-animal.com.ar>.
- Iannone, N. (2012). "Manejo del bicho torito (*Diloboderus abderus*) en el cultivo de trigo". Sistema de alerta - INTA Pergamino.
- Lietti, M.; Gamundi, J.C.; Montero, G.; Molinari, A.; Bulacio, A. (2008). "Efecto de dos sistemas de labranza sobre la abundancia de artrópodos que habitan en el suelo". *Ecología Austral*, Asociación Argentina de Ecología, pp. 71-78.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Nueva Jersey: Princeton University Press.
- May, R. (1975). "Patterns of species abundance and diversity". En: M.L. Cody y J.M. Diamond (eds.), *Ecology and evolution of communities*. (pp. 81-120). Cambridge M.A: Harvard University Press.
- Mondaca, J. (2011). "Primer registro de *Cyclocephala modesta* (Scarabaeidae: Dynastinae: Cyclocephalini) en Chile". *Revista Chilena de Entomología*, 36, pp. 33-38.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T-Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza.
- Orgeas, J. y Andersen A.N. (2001). "Fire and biodiversity: Responses of grass-layer beetles to experimental fire regimes in an Australian tropical savanna". *Journal of Applied Ecology* 38(1), pp. 49-62.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2005). Proyecto de investigación aplicada a los recursos forestales nativos: Parque Chaqueño, subregión Chaco Semiárido. BIRF. 4085/AR.
- Ratcliffe, B. C. (1991). The Scarab Beetles of Nebraska. Bulletin of the University of Nebraska State Museum, 12, pp. 1-333.
- Ratcliffe, B.C. (2008). "More new species of *Cyclocephala* Dejean, 1821 from South America". *The Coleopterists Bulletin*, 62(2), pp 221-241.

- Ratcliffe, B.C. y Cave, R. (2006). The Dynastinae scarab beetles of Honduras, Nicaragua and El Salvador. Bulletin of the University of Nebraska State Museum, 21, pp. 1-42
- Villarreal H.; M.; Alvarez,S.; Córdoba, F.; Escobar, G.; Fagua, F.; Gast, H.; Mendoza, M.; Ospina y Umaña, A. M. (2006). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.
- Zerbino Bardier, M.S. (2002). Efecto de la siembra directa sobre la macrofauna del suelo. Informe n.º30. Recuperado de <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/lepol2002informe-30.pdf>.
- Zerbino Bardier, M. S. (2005). *Evaluación de la densidad, biomasa y diversidad de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de producción*. (Tesis de maestría). Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

María Agustina Marcellino es ingeniera agrónoma, egresada de la UNNOBA. Es becaria de Investigación y Transferencia-UNNOBA, cátedra de Zoología Agrícola. LIZoA. ECANA-UNNOBA.

Jimena Chila Covachina es ingeniera agrónoma, egresada de la UNNOBA. Posee una beca de estudio cofinanciada CIC-UNNOBA, cátedra de Zoología Agrícola. LIZoA. ECANA-UNNOBA.

Carolina Sgarbi es ingeniera agrónoma. Es jefa de Trabajos Prácticos, con dedicación semiexclusiva, de la cátedra de Zoología Agrícola, LIZoA. ECANA-UNNOBA.

Karina Bertone es ingeniera agrónoma, egresada de la UNNOBA.

Ariel Yapur es estudiante de Ingeniería Agrónoma en la UNNOBA.

Mónica Ricci es profesora adjunta a cargo de los cursos de Zoología Agrícola de la UNNOBA y la UNLP. Es ingeniera agrónoma y doctora en Ciencias Agrarias. Se desempeña también como investigadora del Laboratorio en Zoología Aplicada (LiZoA-UNNOBA) y del Centro de Investigación en Sanidad Vegetal (CISaV-UNLP).

LA EVOLUCIÓN Y EL MÉTODO CIENTÍFICO COMO CIMIENTOS DE LA ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

MARÍA JOSÉ APODACA
LILIANA KATINAS
JORGE V. CRISCI

La problemática expansión de la resistencia de las bacterias a los antibióticos y de las malezas a los herbicidas, las semejanzas morfológicas y moleculares entre diferentes grupos de organismos, la unidad de todos los seres vivos reflejada en los ácidos nucleicos, la extraordinaria y asombrosa biodiversidad que nos rodea, el pasado escrito en los fósiles y la posición del hombre en la historia de la vida son todos hechos aislados, pero solo pueden ser comprendidos y relacionados entre sí a la luz de la evolución biológica. La evolución explica y unifica.

¿Es posible enseñar biología sin mencionar la evolución? La respuesta, lamentablemente, es sí, y, en efecto, ocurre todo el tiempo. Pero no es posible que los estudiantes comprendan biología sin el entorno evolutivo; contexto del cual dependen el sentido y el valor de los conceptos biológicos.

La evolución biológica consiste en el cambio de las características hereditarias de grupos de organismos en el curso de varias generaciones. En una perspectiva a largo plazo, la evolución es la descendencia con modificación de diferentes linajes a partir de un ancestro común. Desde una perspectiva de corto plazo, es la adaptación de los organismos a desafíos y cambios ambientales. Por lo tanto, la evolución tiene dos componentes: la relación ancestro-descendiente de los diferentes linajes y los procesos que la causaron.¹

Por otra parte, la humanidad ha desarrollado y confirmado, a través de los siglos, un conjunto de ideas, interconectadas entre sí, que explican —o intentan explicar— los aspectos físicos, biológicos, psicológicos y sociales que la rodean. Este conjunto de ideas, al que llamamos ciencia, ha permitido que las sucesivas generaciones comprendan, cada vez con más profundidad, a los seres vivos y su historia. Por ello, la ciencia es otro factor unificador de la biología. La ciencia requiere de procedimientos pertinentes a los diferentes enfoques disciplinarios. De allí que existan métodos especiales adecuados al tipo de problema que se investiga. No obstante esto, existe un método general que contiene conceptos transversales y prácticas que subyacen a toda investigación.²

En este trabajo presentaremos, de manera sumaria, un mapa de conceptos (Figuras 1, 2 y 3) que combina las ideas centrales de la evolución con las prácticas y conceptos transversales de la ciencia. Los mapas de conceptos^{3 4} son un excelente medio para visualizar las ideas o conceptos y las relaciones jerárquicas entre ellos. Así, ayudan a los estudiantes a clarificar su pensamiento y a procesar, organizar y priorizar nueva información.

Nos ha parecido provechoso añadir un capítulo con las evidencias de la evolución, que sirva como introducción a la enseñanza de la misma. Además, y a manera de ejemplo, agregamos una actividad, con su resolución, en las que se aplica nuestro mapa de conceptos (Apéndice 1).

Finalmente, incluimos una sección en la que proponemos que la evolución no es solo un elemento unificador, sino que constituye una narrativa que brinda una razón al docente para enseñar y al estudiante para aprender biología.

Figura 1. Mapa de conceptos (parte I) que muestra las relaciones entre la biología evolutiva y el método científico como base para la enseñanza de la biología.

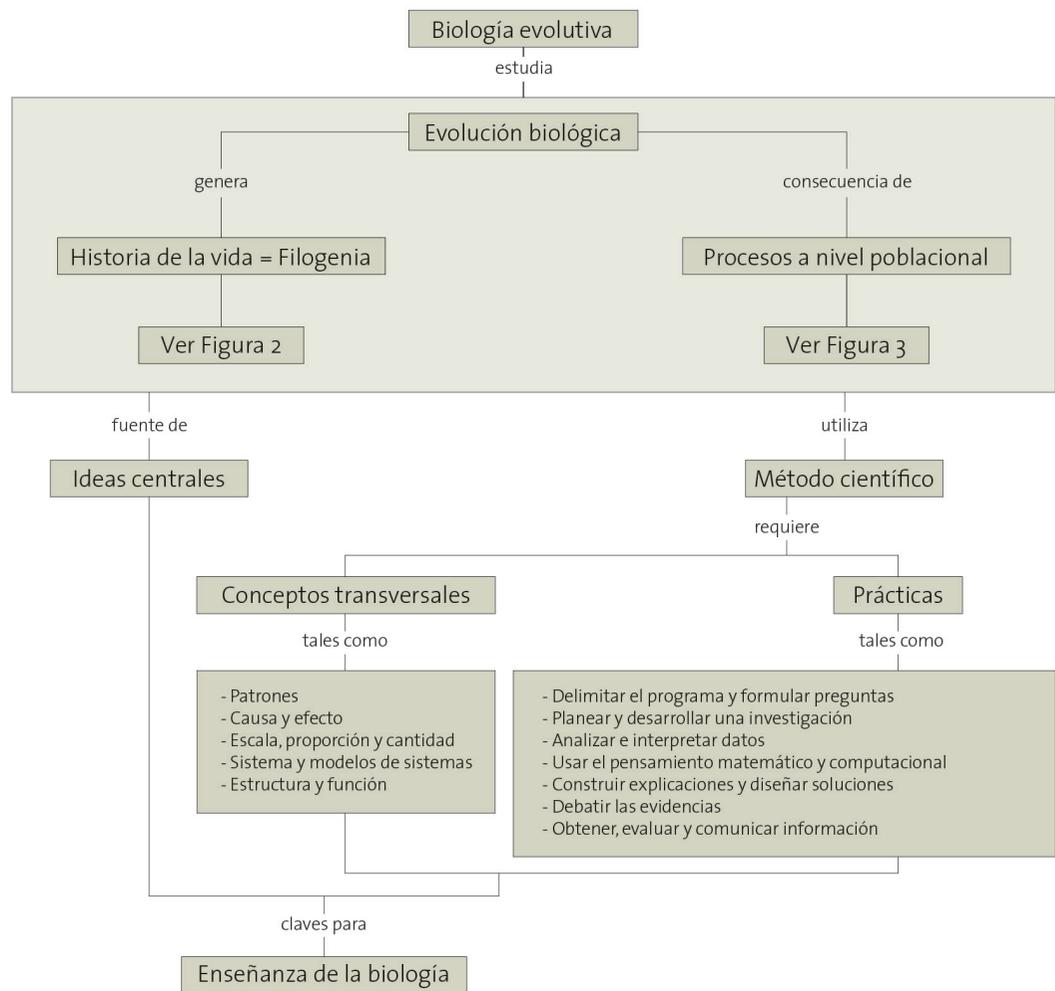
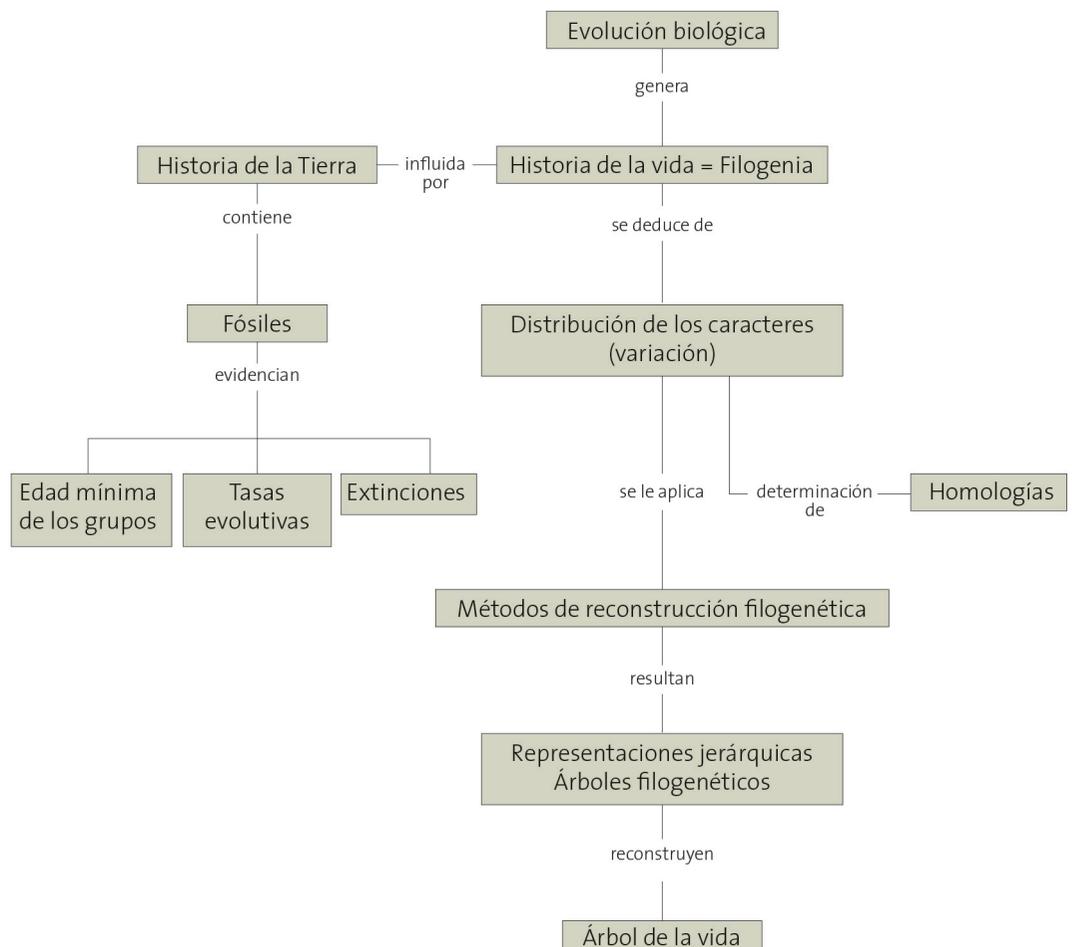


Figura 2. Mapa de conceptos (parte II) que muestra la historia de la vida como un producto de la evolución biológica y su representación por árboles filogenéticos.



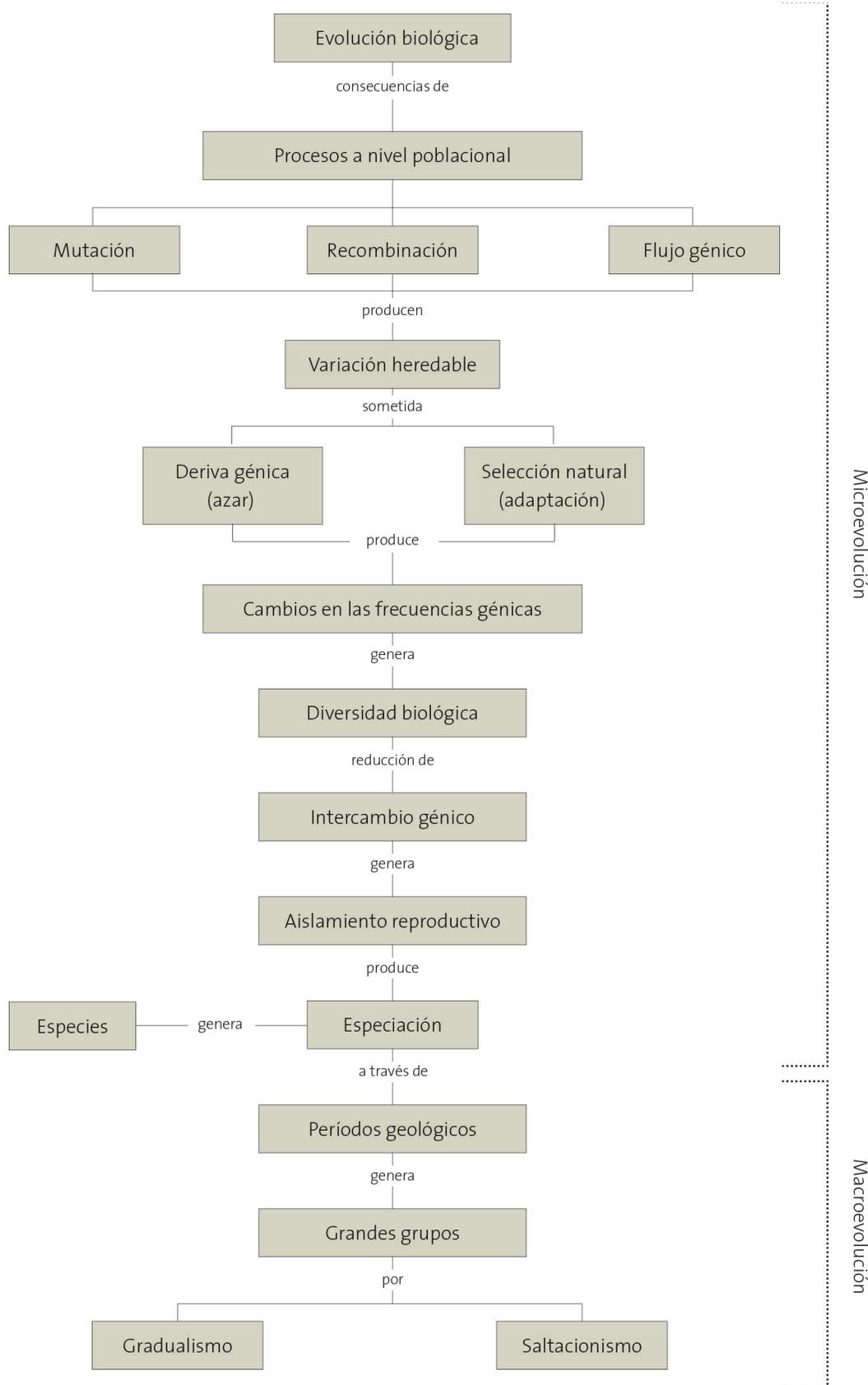


Figura 3. Mapa de conceptos (parte III) que muestra los procesos a nivel poblacional que generan la evolución biológica desde la micro- a la macroevolución.

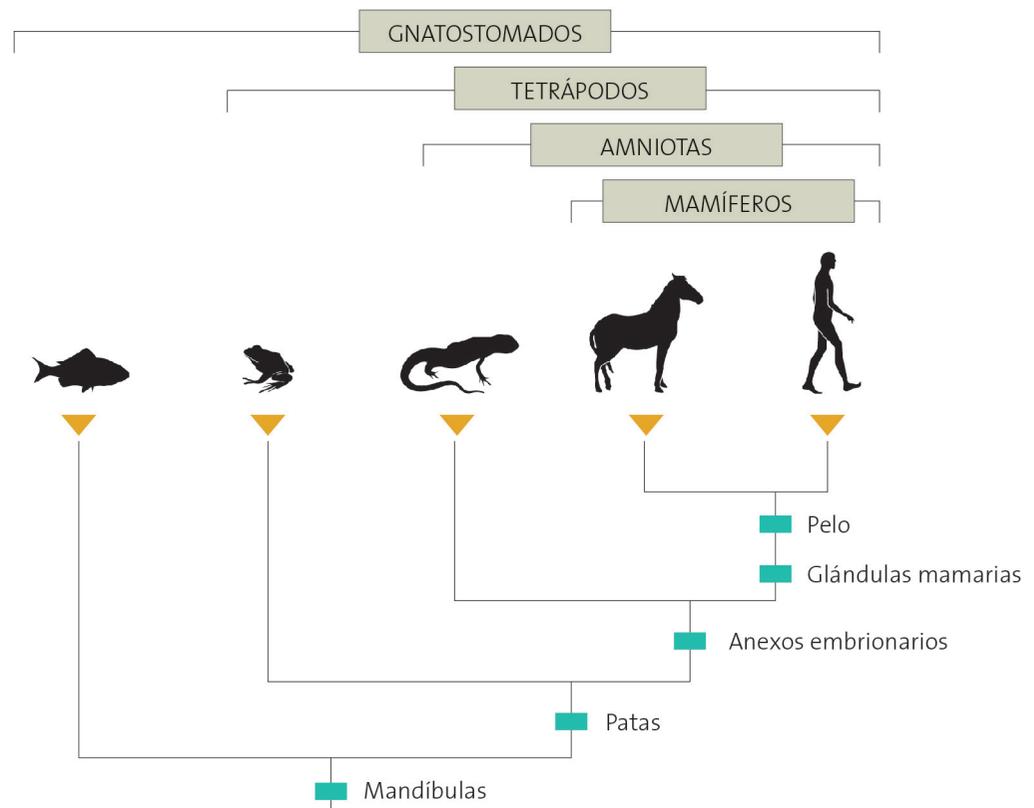
IDEAS CENTRALES DE LA EVOLUCIÓN

La Figura 1 muestra que la **biología evolutiva** responde dos preguntas: ¿cuál es la historia de la vida?, la cual se explica en la Figura 2, y ¿qué procesos la causaron?, que encuentra respuesta en la Figura 3.

La primera pregunta (Figura 2) se contesta reconstruyendo el árbol genealógico de la vida. Charles Darwin (1809-1882) fue uno de los primeros naturalistas en sugerir, en 1859, la imagen de un árbol genealógico para representar la **historia de la vida**. En 1866 Ernst Haeckel (1834-1919) creó el concepto de **filogenia** para definir esa historia.

Luego de numerosos intentos de formular un **método de reconstrucción de la filogenia** y su representación gráfica, el biólogo Willi Hennig (1913-1976) presentó en 1950 las bases de un método al que se denominó "sistemática filogenética" o "cladismo". Este método utiliza la **distribución de los caracteres de los organismos (variación)**, determina **homologías**, forma los grupos en función de las novedades evolutivas que presentan y se basa en el principio de simplicidad para reconstruir la relación ancestro-descendiente. El principio de simplicidad (metodológico, no ontológico) postula que los cambios evolutivos suceden de la forma más económica posible desde el punto de vista de los eventos genéticos que los generan. La Figura 4 es un **árbol filogenético** de algunos vertebrados con las principales novedades evolutivas que definen a cada grupo.

Figura 4. Árbol filogenético que muestra las relaciones de algunos vertebrados, con las principales novedades evolutivas que definen a cada grupo.



Recientemente, y con el propósito de aplicarlos a datos moleculares (secuencias de ácidos nucleicos), se han propuesto además métodos estadísticos basados en el cálculo de probabilidades, como el de máxima verosimilitud o el bayesiano.

Por la complejidad de los cálculos, en la mayoría de los casos de reconstrucción filogenética se utilizan herramientas computacionales. Todos los métodos se basan en los siguientes postulados básicos:

1. La naturaleza tiene una **estructura jerárquica**.
2. Esa estructura jerárquica puede representarse por diagramas ramificados denominados árboles filogenéticos o cladogramas.
3. La estructura jerárquica de la naturaleza puede rescatarse mediante un muestreo de caracteres homólogos.

Caracteres homólogos son aquellos que fueron originados, con o sin modificación, a partir del ancestro común de ese grupo (por ejemplo, los miembros anteriores de los tetrápodos, como las patas del perro y las de las ovejas). La homoplasia (no es útil para establecer relaciones ancestro-descendiente) es el concepto complementario de la homología: se presenta cuando dos o más organismos poseen atributos similares y/o con la misma función, que no fueron originados en el ancestro común a esos organismos (por ejemplo, los ojos complejos de los vertebrados y los de los cefalópodos).

La Figura 5 es un árbol filogenético (basado en datos morfológicos y moleculares) que muestra las relaciones de los grandes grupos de seres vivos, desde las bacterias hasta el hombre (*Homo sapiens*).

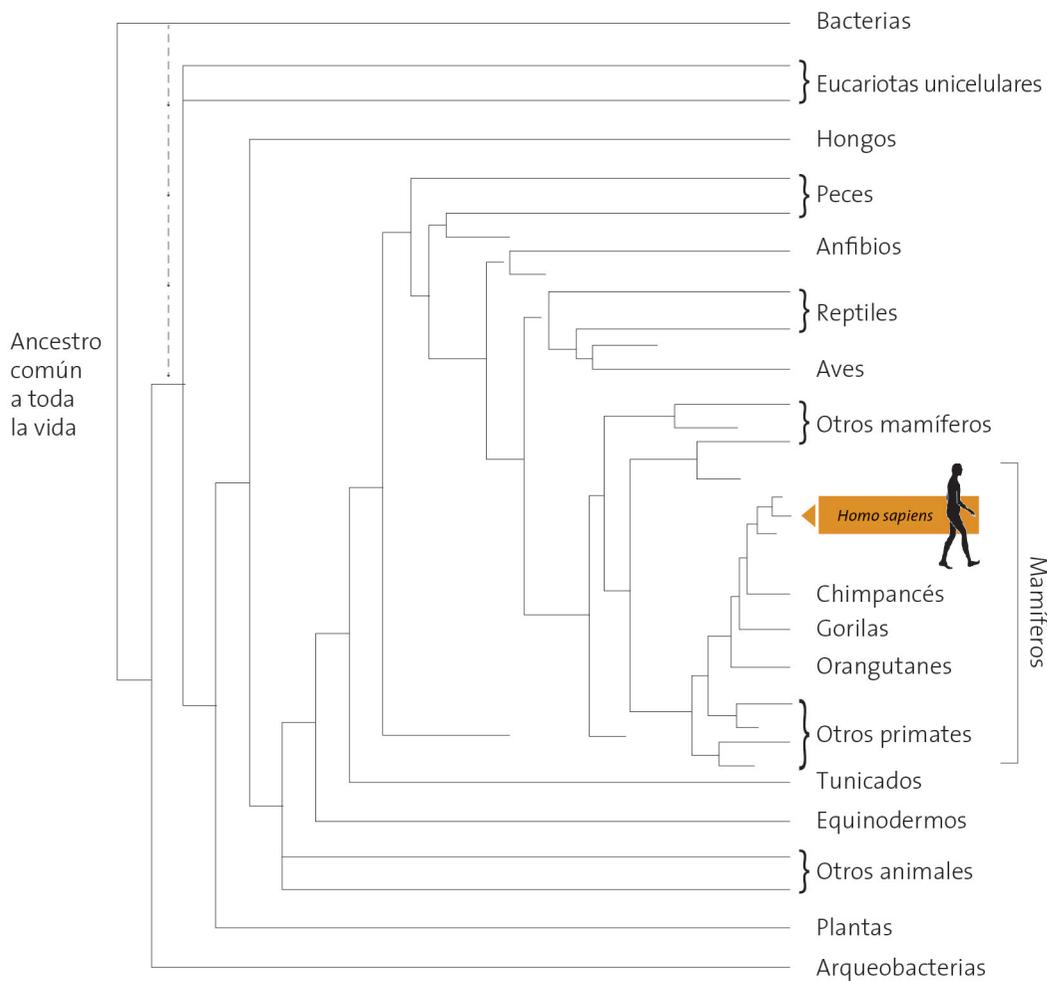


Figura 5. Árbol filogenético que muestra las relaciones de los grandes grupos de seres vivos. Las ramas sin labels y más cortas significan extinciones. La línea punteada muestra el evento evolutivo por el cual una bacteria simbiótica se transformó en mitocondria de las células del resto de los seres vivos (excepto las arqueobacterias).

Los 3500 millones de años de la historia de la vida han estado siempre bajo la influencia de la **historia de la Tierra**. Los **fósiles** (restos o evidencias de vida de más de 5000 años) son las huellas de ese pasado y son un elemento fundamental para establecer la **edad mínima de los grupos** y las **tasas de evolución** de cada uno de ellos. Los fósiles también nos muestran el fenómeno de la **extinción** (desaparición de todos los integrantes de un grupo de seres vivos), hecho común en la historia de la vida.

El primer paso para responder la segunda pregunta (¿Qué procesos causaron la historia de la vida?) es investigar cuáles son los mecanismos de la evolución (Figura 3).

Los cambios evolutivos se deben principalmente a tres tipos básicos de **procesos que actúan a nivel poblacional**: mutación, recombinación génica y flujo génico. **Mutación** es un proceso de alteración de un gen o de un cromosoma, así como el estado alterado producto de ese proceso, independientemente de si genera o no un cambio en las características visibles del organismo. La **recombinación génica** es producto de la combinación de genes de ambos progenitores en la reproducción sexual. No se trata de una fuerza que cambia la frecuencia de genes en la población, pero sí produce nuevas combinaciones de genes. **El flujo génico** es el aumento de la variación por nuevos genes aportados por la llegada de individuos de otras poblaciones.

Estos procesos básicos son los que generan la **variación heredable**. A su vez, esta se encuentra sometida a procesos que cambian la **frecuencia génica de las poblaciones**, como la selección natural (adaptación) y la deriva génica.

La **selección natural** se basa en que los diferentes fenotipos (características de los individuos como consecuencia de la interacción del genotipo con el ambiente) poseen distinta capacidad de supervivencia y/o reproducción en el ambiente en que viven, lo cual genera una perpetuación diferencial de los respectivos genotipos. Se denomina **adaptación** a aquella característica que aumenta la supervivencia y/o la reproducción del organismo que la porta, en un ambiente determinado. La selección natural es el único mecanismo conocido que origina las adaptaciones, por lo que podría decirse que una adaptación es una característica que evolucionó por selección natural.

La **deriva génica** está representada por cambios al **azar**, no adaptativos, en la frecuencia de dos o más genotipos (la totalidad de los genes que un individuo recibe de sus progenitores) dentro de una misma población, como consecuencia de las fluctuaciones debidas a “errores de muestreo” (procesos aleatorios). Por ejemplo, el proceso llamado “cuello de botella”, en el que un pequeño número de individuos de una población migra y se establece como colonizador (fundadores) de una nueva población. Como los fundadores son una pequeña muestra de la población original, la frecuencia de los genotipos en la nueva población puede diferir por azar de aquellos de la población fuente.

La selección natural y la deriva génica son los procesos que generan la diversidad biológica. La **diversidad biológica** no es un continuo, puesto que a través de una reducción del **intercambio génico** entre poblaciones se genera **aislamiento reproductivo** entre ellas, lo que conduce al proceso de **especiación** o formación de nuevas especies. Los miembros de una **especie** pueden diferir genética, ecológica, etológica o morfológicamente de los de otras, pero las especies se diferencian entre sí, en la mayoría de los casos, por estar aisladas reproductivamente de otras especies.

La definición de especie es un tema muy controvertido. Se la ha definido de muy diversas maneras,⁵ pero el criterio más utilizado, aunque no exento de dificultades, es el concepto biológico de especie: grupo de poblaciones naturales, genéticamente similares, interfértiles y aisladas reproductivamente de otros grupos análogos.

La especiación, por lo tanto, es responsable de las discontinuidades que observamos en la diversidad biológica. Estas discontinuidades van desde el nivel de especie (**microevolución**) a los niveles de **grandes grupos (macroevolución)**. Los cambios macroevolutivos ocurren con la aparición de características que distinguen grandes grupos, tales como los mamíferos, los insectos o las plantas con flores. Son cambios que ocurrieron en una escala de tiempo geológico. La macroevolución presenta dos escuelas de pensamiento: el gradualismo y el saltacionismo.

El **gradualismo** explica la macroevolución como el resultado de la acumulación de pequeñas modificaciones a lo largo de los **períodos geológicos**. La única diferencia entre macro- y microevolución sería entonces la cantidad de tiempo en el que transcurren. Por tanto, la macroevolución es una simple extensión en el tiempo de la microevolución.

Por otro lado, el **saltacionismo** propone que la macroevolución incluye factores o procesos puntuales que solo operan a nivel macroevolutivo. Por ejemplo, grandes cambios en los cromosomas (macromutaciones) darían origen a organismos muy diferentes, que se adaptarían a nuevos modos de vida y generarían las diferencias entre los grandes grupos.

La oposición binaria⁶ gradualismo-saltacionismo puede ser superada con la siguiente argumentación: las fuerzas evolutivas de la microevolución funcionan y son causantes de la mayoría de los grandes grupos que hoy vemos. Sin embargo, en la larga historia de la vida podemos aceptar la ocurrencia ocasional de eventos únicos con grandes consecuencias. Por ejemplo, el evento evolutivo por el cual una bacteria simbiótica se transformó en mitocondria de las células de la mayoría del resto de los seres vivos (Figura 5).

CONCEPTOS TRANSVERSALES Y PRÁCTICAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

Una manera de unir la enseñanza de la evolución al método científico es aplicar en el aula los **conceptos transversales** y las **prácticas** que el científico utiliza en sus investigaciones.

A modo de ejemplo, un concepto transversal es el de patrones, es decir, ciertas características u objetos que se repiten de manera predecible. Existen patrones en todas partes: en la simetría de las flores y en los pares de bases nitrogenadas repetidas del ADN, entre otros. Registrar los patrones es el primer paso para luego poder hacer preguntas evolutivas sobre por qué y cómo se producen los patrones y cuáles son los factores que los influyen. Los patrones ocupan un lugar destacado cuando se realiza un análisis e interpretación de datos.

Los conceptos transversales proveen a los alumnos de conexiones y herramientas intelectuales que se relacionan a través de las diferentes áreas de contenidos disciplinares y que pueden enriquecer la aplicación de prácticas y la comprensión de las ideas centrales. No hay mejor manera de comprender un concepto que entendiendo cómo fue generado. De este modo se buscará despertar el interés de los estudiantes por la investigación. En el Cuadro 1 se citan otros conceptos transversales.

Por otro lado, las prácticas son aquellos pasos que realizan los científicos en sus investigaciones. Un ejemplo de prácticas es delimitar un problema y formular preguntas. La formulación de preguntas puede surgir de diversas maneras: por simple curiosidad por el mundo que nos rodea, inspirados en las predicciones de un modelo, de una teoría o en los resultados de investigaciones anteriores. La biología evolutiva, como hemos visto, se hace dos grandes preguntas que la sustentan y la organizan: ¿cuál es la historia de la vida? y ¿qué procesos la generaron? En el Cuadro 1 se mencionan más ejemplos de prácticas.

Además, en el Apéndice 1 se proporciona un ejemplo de actividad docente en la que se emplean algunas ideas centrales de la evolución y algunos conceptos transversales y prácticas.

EVIDENCIAS DE LA EVOLUCIÓN

¿Cuáles son las pruebas de que la evolución ha ocurrido —y ocurre— en la historia de la vida? Entre ellas podemos mencionar el registro fósil, la unidad de la vida, la evolución observada, las estructuras vestigiales, los estudios de anatomía comparada y la distribución espacial de los organismos. A continuación las describiremos brevemente:

El **registro fósil**: algunos fósiles muestran estadios intermedios entre grupos afines. Por citar un caso, las hormigas y las avispas están emparentadas. Los científicos propusieron un eslabón teórico de características intermedias entre ambos grupos. Años después de que se hiciera esta propuesta se descubrió en una piedra de ámbar una hormiga fosilizada con las características predichas.^{7 8}

La **unidad de la vida**: la mayoría de las formas vivientes son similares en muchos aspectos y ello es particularmente sorprendente en el campo de la bioquímica. De los virus al hombre, la herencia se codifica en solo dos macromoléculas químicamente relacionadas: el ADN y el ARN. El código genético es tan simple como universal: hay tan solo cuatro nucleótidos —adenina, guanina, timina y citosina— en el ADN; en el ARN la timina es reemplazada por el uracilo. La evolución ocurrió, y ocurre, a partir de nuevas combinaciones de esos nucleótidos. Estas similitudes sugieren que la vida surgió solo una vez y que todos los organismos, en toda su diversidad, conservan las características básicas de esa vida primigenia.

La **evolución observada**: es aquella que el hombre ha podido documentar, pues sucede a una tasa tal que nos permite ser testigos de estos cambios evolutivos. Existen dos ejemplos emblemáticos de evolución observada: la resistencia de las bacterias a los antibióticos y la resistencia de las malezas a los herbicidas. A los tres años del surgimiento y uso extendido del antibiótico penicilina, se hallaron tres especies de bacterias resistentes a ella. Cada nuevo antibiótico, desarrollado por el hombre en respuesta a la disminución de la eficacia de los antibióticos anteriores, ha provocado la evolución de bacterias resistentes al nuevo producto. Lo mismo sucedió con la peligrosísima cepa MRSA de *Staphylococcus aureus* que generó —y aún continúa generando— numerosas muertes por infección hospitalaria. Esta bacteria ha evolucionado constantemente en formas resistentes a la mayoría de los antibióticos con los que se la ha combatido. Es importante destacar que ni los antibióticos ni los herbicidas generan las mutaciones que otorgan resistencia; esas resistencias existían en unos pocos individuos quienes, al sobrevivir, proliferaron, al mismo tiempo que, por selección natural, disminuían los no resistentes.

Las **estructuras vestigiales**: representan aquellas características que tuvieron una función en algún ancestro, pero ya no tienen tal función en las especies descendientes. Por ejemplo, hay abejas no voladoras que poseen alas rudimentarias.

Los estudios de **anatomía comparada**: estos han demostrado que las características de los organismos casi siempre evolucionan de formas preexistentes presentes en sus ancestros. Los huesecillos del oído medio de los mamíferos evolucionaron a partir de los huesos de la mandíbula de los reptiles, pasando de una función alimenticia a una función auditiva.

La **distribución de los seres vivos**: la biogeografía de América del Sur inspiró a Charles Darwin a proponer, en 1859,⁹ una teoría de la evolución por selección natural. La genealogía de la vida fue justificada en la sucesión espacial, en áreas adyacentes, de especies ligadas por sus afinidades morfológicas, por ejemplo, las dos especies de ñandúes de América del Sur austral. La idea de selección natural le fue inspirada a Darwin por la distribución de un grupo de pájaros de las islas Galápagos y su pico adaptado al tipo de alimento que ofrecía cada una de las islas.¹⁰

LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA COMO NARRATIVA

Al considerar cómo llevar a cabo la enseñanza tenemos dos problemas que resolver. Uno es un problema de ingeniería; el otro es metafísico. El primero es esencialmente técnico: es el problema de los medios con los cuales el estudiante será educado. Aborda las cuestiones de dónde y cuándo se harán las cosas y, por supuesto, se pregunta cómo se supone que ocurrirá el aprendizaje. El problema no es simple, y cualquier proyecto educativo respetable tiene que ofrecer algunas soluciones para esto. Nuestro mapa de conceptos es un intento en esa dirección técnica.

Pero convertirse en una persona diferente a partir de algo que se ha aprendido; apropiarse de una idea, de un concepto, de una visión de tal manera que esto origine un cambio en nuestro mundo: eso es un problema diferente.

Para que esto suceda, se necesita una razón. Y ese es un problema metafísico. Una razón, como usamos la palabra aquí, es algo distinto de una motivación. Dentro del contexto de la enseñanza, la motivación se refiere a un evento psíquico temporario por medio del cual se despierta la curiosidad y se atrae la atención del alumno. No es nuestra intención menospreciarla. Sin embargo, no debe ser confundida con tener una razón para estar en un aula, para escuchar a un maestro, para hacer un examen, para hacer las tareas, para estar al día con la escuela, aun cuando no se esté motivado. Este tipo de razón es algo abstracto, no siempre presente en nuestra conciencia, no siempre fácil de describir. Pero, por sobre todo esto, sin ella la enseñanza no funciona.

Para que la escuela tenga sentido, los jóvenes, sus padres y sus maestros tienen que tener un relato o, mejor aún, varios relatos. Si no tienen ninguno, la escuela no tiene sentido. El famoso aforismo de Nietzsche es aquí relevante: “El que tiene un por qué para vivir puede soportar casi cualquier cómo”. Esto se aplica tanto a vivir como a aprender.

Entendemos por relato una historia; no cualquier tipo de historia, sino una que nos habla de los orígenes y que imagina un futuro, una historia que construye ideales, prescribe reglas de conducta, genera fuentes de autoridad y, sobre todo, da un sentido de continuidad y propósito. En el sentido en que empleamos la palabra, es el nombre de un gran relato, uno que tiene suficiente credibilidad, complejidad y poder simbólico como para permitirnos organizar nuestra vida alrededor de él. Un relato unificador sobre cómo es la vida, cómo las cosas llegaron a ser de la forma que son y qué se avecina.

Un relato que contiene suficiente resonancia y poder para ser la razón de enseñar biología es la evolución biológica. La evolución biológica, como relato, es una narración inspiradora de la vida en nuestro planeta y del origen del hombre en ella. Habla de la fragilidad humana e invoca nuestro sentido de custodios de la diversidad biológica.

Jorge Luis Borges (1899-1986), el gran escritor argentino, se hizo una pregunta cuya respuesta refleja en su totalidad el tema de la evolución como razón para enseñar biología:

A un chico lo llevan por primera vez al jardín zoológico. Ese chico será cualquiera de nosotros o, inversamente, nosotros hemos sido ese chico y lo hemos olvidado. En ese jardín, [...] el chico ve animales vivientes que nunca ha visto; ve jaguares, buitres, bisontes y, lo que es más extraño, jirafas. Ve por primera vez la desatinada variedad del reino animal, y ese espectáculo, que podría alarmarlo u horrorizarlo, le gusta. Le gusta tanto que ir al jardín zoológico es una diversión infantil, [...]. ¿Cómo explicar este hecho común y a la vez misterioso?

[...] el niño mira sin horror a los tigres porque no ignora que él es los tigres y los tigres son él o, mejor dicho, que los tigres y él son de una misma esencia [...]¹¹

En su respuesta Borges nos dice que el niño percibe, inconscientemente, que compartimos el precioso momento del origen de la vida con el resto de los seres vivos.

La enseñanza de la evolución nos lleva a aquel extraordinario momento, 3500 millones de años atrás, con el objeto de concientizar y fomentar en nuestros niños, y en todos nosotros, un sentido de pertenencia a la naturaleza y de hermandad con ella.

CUADRO 1. MÉTODO CIENTÍFICO: CONCEPTOS TRANSVERSALES Y PRÁCTICAS

CONCEPTOS TRANSVERSALES

- Causa y efecto (o mecanismo y explicación). Suele ser el siguiente paso luego de la búsqueda de patrones. Los eventos tienen causas que pueden ser, a veces, simples y, otras veces, multifacéticas. Una actividad importante en ciencia es investigar y explicar las relaciones causales y los mecanismos que las median. Tales mecanismos pueden después ponerse a prueba a través de determinados contextos y utilizarse para predecir y explicar eventos en contextos nuevos.

- Escala, proporción y cantidad. Al considerar fenómenos, es crítico reconocer los conceptos de escala, proporción y cantidad, ya que constituyen evaluaciones fundamentales de las dimensiones de las observaciones realizadas.

- Sistemas y modelos de sistemas. Debido a que el mundo es complejo, resulta útil aislar un único sistema y construir un modelo simplificado de él. Definir el sistema en estudio, especificando sus límites y elaborando un modelo explícito de él, proporciona las herramientas para comprender y poner a prueba ideas que pueden ser empleadas en biología y en otras disciplinas.

- Estructura y función. Son propiedades complementarias: la manera en que un objeto o un ser viviente están formados y su subestructura determinan muchas de sus propiedades y de sus funciones.

PRÁCTICAS

- Desarrollar y utilizar modelos. Los modelos se utilizan para representar un sistema o partes de un sistema en estudio. Incluyen diagramas, maquetas físicas, representaciones matemáticas, analogías y simulaciones en computadoras. Aunque los modelos no se corresponden exactamente con el mundo real, son aproximaciones y suposiciones que limitan la gama de validez y capacidad de predicción, por lo que es importante que los estudiantes reconozcan sus limitaciones.

- Planear y desarrollar una investigación. Se deben diseñar investigaciones que generen datos que aporten pruebas para respaldar las afirmaciones que se hacen sobre los fenómenos. Pueden llevarse a cabo para describir un fenómeno o para probar una teoría o modelo. Es importante señalar cuál es el objetivo de una investigación. Los datos no son pruebas hasta que se usen en el proceso de apoyar una hipótesis.

- Analizar e interpretar datos. Una vez recogidos los datos, estos deberán ser representados de modo tal que puedan revelar algunos patrones y relaciones, ya que los datos en bruto tienen poco sentido. Por ello es importante organizar e interpretar los datos a través de la tabulación, la representación gráfica o el análisis estadístico. Así, los datos podrán ser utilizados como evidencia en las hipótesis planteadas.

- Utilizar las matemáticas y el pensamiento computacional. La matemática es una herramienta clave para la comprensión de la ciencia. Es útil para representar magnitudes físicas y sus relaciones, y para hacer predicciones cuantitativas. Las computadoras y herramientas digitales pueden mejorar el poder de las matemáticas mediante la automatización de los cálculos o el análisis de grandes conjuntos de datos disponibles para identificar patrones significativos.

- Construir explicaciones y diseñar soluciones. El objetivo de la ciencia es construir explicaciones y teorías de las causas de los fenómenos observados en el mundo. Una teoría es aceptada cuando tiene múltiples líneas de evidencia empírica y una mayor capacidad explicativa de los fenómenos que las teorías anteriores.

- Debatir y argumentar evidencias. El argumento (proceso basado en la evidencia) y el razonamiento conducen a explicaciones aceptables y son esenciales para identificar la mejor explicación de un fenómeno natural.

- Obtener, evaluar y comunicar información. Es necesario desarrollar en los estudiantes la capacidad para leer, interpretar y producir textos de dominio específico.

APÉNDICE 1

Ejemplo de una actividad para el cuarto, quinto y sexto año del colegio secundario, con la aplicación de las ideas centrales de la evolución, los conceptos transversales y las prácticas mencionados en el texto. Al final se incluye la resolución de cada ítem.

Ideas centrales que se aplican en esta actividad: Diversidad biológica, evolución, adaptación, filogenia, árbol filogenético, principio de simplicidad.

Conceptos transversales que se aplican en esta actividad: Patrones, sistemas, causa y efecto: ítems 1 y 5. Causa y efecto, estructura y función: ítem 7.

Prácticas que se aplican en esta actividad: Delimitar el problema y formular preguntas: ítem 1, ítem 8. Analizar e interpretar datos: ítem 3, ítem 1, ítem 6, ítem 8. Construir explicaciones y diseñar soluciones: ítem 1, ítem 7. Debatir evidencias: ítem 7, ítem 8. Evaluar información: ítem 1, ítem 4, ítem 5, ítem 7, ítem 8.

ACTIVIDAD

Conceptos que el alumno debe conocer antes del desarrollo del trabajo práctico: los grandes grupos vegetales: generalidades de musgos, helechos, gimnospermas, angiospermas. Función de ciertos órganos y estructuras: cutícula, tejido vascular, semilla, flor. Concepto de evolución, árbol filogenético, ancestro, adaptación, principio de simplicidad.

1) Construye un árbol filogenético con los siguientes elementos: bicicleta, patineta, automóvil, motoneta. Ubica en el árbol una sola vez (principio de simplicidad) las siguientes características (novedades evolutivas): techo, motor, ruedas, asiento. ¿Podrías haber construido otros árboles donde los medios de transporte se relacionen entre sí de distinta manera? En ese caso, ¿los caracteres se ubicarían una sola vez o más de una vez en esos árboles? ¿Los árboles tendrían más pasos, pues las novedades evolutivas aparecerían más de una vez en el árbol? ¿Por qué deberías seleccionar el árbol donde aparecen las novedades evolutivas una sola vez?

2) Recolecta plantas que incluyan: musgos, helechos, gimnospermas y angiospermas.

3) Separa las plantas recolectadas en los cuatro grupos, reconociendo sus características.

4) De acuerdo con tu criterio, ordena las siguientes novedades evolutivas, según su aparición cronológica, desde las más antiguas a las más modernas: presencia de flores, presencia de cutícula, presencia de semilla, presencia de tejido vascular.

5) Sobre la base de los ítems anteriores, construye el árbol filogenético que refleje la evolución de las plantas, utilizando los grupos y los caracteres de los ítems 2 y 3.

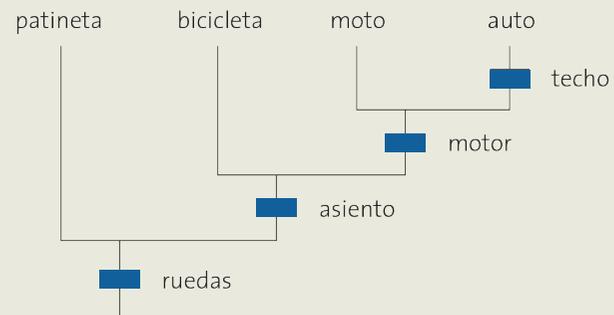
6) ¿Qué ventaja adaptativa les dio cada novedad evolutiva (cutícula, tejido vascular, semilla, flor) a los distintos grupos?

7) ¿Puedes explicar, de acuerdo con lo que contestaste en el ítem anterior, por qué los musgos son plantas pequeñas de lugares húmedos, mientras que los helechos son más grandes pero, generalmente, habitan también en lugares húmedos?

8) Recorriste un lugar inexplorado y encontraste:

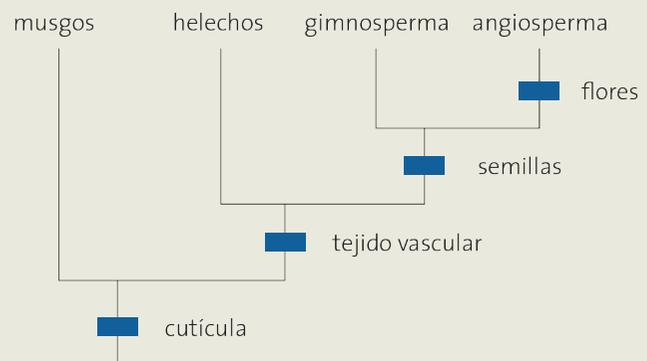
a) una nueva especie que tiene tejido vascular y se reproduce por esporas. ¿En qué grupo de tu árbol la ubicarías?

b) una nueva especie de planta acuática con flores que carece de cutícula. ¿En qué grupo de tu árbol la ubicarías y por qué?

RESOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD**Ítem 1:**

Sí, se podrían haber construido todas las combinaciones de relaciones entre los cuatro medios de transporte. En esos casos, algunos caracteres habrían aparecido independientemente más de una vez en los árboles. Pero esos árboles no se ajustarían al principio de simplicidad, ya que tendrían un mayor número de pasos (número de veces en que se ubican los caracteres en los árboles) que el que se muestra en la actividad (4 pasos).

Ítem 4: Cutícula, tejido vascular, semilla, flores.

Ítem 5:

Ítem 6: Cutícula: adaptación al ambiente terrestre; tejido vascular: circulación interna de sustancias por toda la planta; semilla: independencia del agua en la reproducción, protección del embrión; flor: mayor éxito reproductivo por atracción de polinizadores.

Ítem 7: Los musgos no pueden alcanzar mayor tamaño y habitan en lugares húmedos porque no tienen tejido vascular que lleve el agua a todas las partes de la planta. Si bien los helechos ya tienen tejido vascular y pueden incluso ser arborescentes, todavía necesitan del agua para su reproducción. Por ello, se encuentran comúnmente en lugares húmedos.

Ítem 8 a: Helechos.

Ítem 8 b: Angiospermas. Las plantas tienen adaptaciones a ambientes particulares y pueden perder en forma secundaria ciertas características que son típicas de todo ese grupo de plantas. En este caso, las plantas acuáticas, como no se desecan, generalmente carecen de cutícula.

NOTAS

1. Futuyma D.J. (2013). *Evolution*. Third Edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates.
2. "Achieve, Inc. on behalf of the twenty-six states and partners that collaborated on the NGSS" (2013). En *Next Generation Science Standards*. Recuperado de <http://nextgenscience.org/next-generation-science-standards>.
3. Novak J. D. (1998). *Learning, Creating, and Using Knowledge: Concept Maps as Facilitative Tools in Schools and Corporations*. Mahwah, Nueva Jersey: Lawrence Erlbaum Associates,
4. Crisci J. V., Katinas L., McInerney J. D., Apodaca M. J. (2014). "Taking biodiversity to school: Systematics, evolutionary biology, and the nature of science". *Systematic Botany* (39)3, 677-680.
5. Crisci, J. V. (1981). "La especie: realidad y conceptos". SYMPOSIA, VI Jornadas Argentinas de Zoología, La Plata, 21-32.
6. Crisci J. V. y Katinas L. (2009). "Darwin, historical biogeography and the need of overcoming binary opposites". *Journal of Biogeography* (36)6, 1027-1031.
7. Futuyma D. J., *op. cit.* supra, nota 1.
8. Wilson E. O., Carpenter M., Brown Jr. W. L. (1967). "The first Mesozoic ants". *Science* 157(3792), 1038-1040.
9. Darwin C. (1859). *On the Origin of Species: A Facsimile of the First Edition* (1976). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
10. Katinas L., Crisci J. V. (2009). "Darwin y la biogeografía". *Ciencia Hoy* (19)113, 30-35.
11. Borges J. L. (1984). *Manual de Zoología Fantástica*. México: Fondo de Cultura Económica.

Agradecimientos:

Agradecemos a Julieta Tejeda las ilustraciones de este trabajo, y al Dr. Ángel R. Plastino por el honor de permitirnos publicar este trabajo en la revista que él dirige.

María José Apodaca es licenciada en Biología, docente de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata y becaria doctoral del CONICET.

Liliana Katinas es doctora en Ciencias Naturales, profesora de las Facultades de Ciencias Naturales y Museo y de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata e investigadora principal del CONICET.

Jorge V. Crisci es doctor en Ciencias Naturales, profesor emérito de la Universidad Nacional de La Plata, profesor de posgrado de la Universidad Nacional de Quilmes e investigador superior del CONICET (contratado).

MOTORES MOLECULARES

CONSTANCIO MIGUEL ARIZMENDI

Una célula no es una bolsa llena al azar de moléculas gigantes, proteínas, ADN, enzimas, etc. La célula, además de tener todos esos componentes, está organizada: nutrientes y desechos son llevados por canales específicos de la membrana; las proteínas son construidas en el ribosoma (un complejo molecular que se encarga de sintetizar proteínas a partir de la información genética que les llega del ADN) y la transcripción del ADN se produce en el núcleo celular. Para lograr esta organización compleja, se requiere un sistema de transporte. Por ejemplo, los nutrientes que pasan por la membrana deben ser conducidos a los lugares correspondientes o las proteínas recién fabricadas deben transportarse para su utilización. Un sistema de transporte está constituido por vehículos y caminos. Los que actúan como vehículos en la célula son proteínas especializadas, llamadas **motores moleculares**, que se clasifican en diferentes tipos o familias de acuerdo con su estructura y su función. Entre los más importantes se encuentran las **miosinas**, que actúan en los músculos esqueléticos, y las **kinesinas**, transportadoras fundamentales en las células.

Los movimientos de las células, así como los de sus componentes, se caracterizan por ser no inerciales, o sea que las fuerzas viscosas presentes son tan grandes que el término inercial mdv/dt de la ecuación de Newton puede ser despreciado. El número de Reynolds (Re), que describe la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas viscosas, se calcula como $\rho vl/\mu$, donde ρ es la densidad, v es la velocidad, l es una longitud relevante del sistema y μ es la viscosidad. Las células humanas tienen una longitud transversal de alrededor de 10 micrones y se mueven a velocidades del orden de los 10 micrones/segundo. Las células experimentan un Re de 10^{-4} , lo que implica que las fuerzas viscosas sobre la célula son diez mil veces más fuertes que las inerciales.¹ Edward Purcell, en su artículo “Life at Low Reynolds Number” (“La vida a bajo número de Reynolds”),² muestra que, a diferencia de la natación (movimiento inercial) que practicamos los seres humanos, para lograr la locomoción en estos casos se deben realizar cambios de forma cíclicos en los que la secuencia de configuraciones en una mitad del ciclo no es la misma que en la otra mitad. Es decir que un grado de asimetría es necesario para el movimiento. En los modelos propuestos para entender el movimiento de los motores moleculares aparece esta asimetría.

Si no hubiera inercia, y sin una fuerza en una dirección constante, el movimiento celular no existiría, salvo por la difusión y las corrientes de fluidos. Sin embargo, las células poseen una sofisticada red estructural interna —el citoesqueleto— compuesta por diversas proteínas que se conforman en filamentos y tubos cuya longitud varía aproximadamente entre cien nanómetros y unos pocos milímetros. Estos microtúbulos rígidos —estructuras tubulares de alrededor de 20 nm de diámetro, formadas por dímeros de una proteína llamada tubulina— soportan la compresión a la que son sometidas las células y, a la vez, constituyen los caminos por los que se desplazan algunas proteínas motoras, como la kinesina. Otros componentes importantes del citoesqueleto son los filamentos de actina: cabos sueltos que proveen de resistencia al estiramiento a la célula. Las miosinas y los filamentos de actina son particularmente interesantes porque participan en el movimiento de la célula, sus cambios de forma y la interacción con el medio.

La kinesina fue descubierta en 1985 por Ronald Vale, del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, en Massachusetts, Estados Unidos, quien la obtuvo de axones de neuronas de calamar gigante.³ Se la nombró “kinesina” por la palabra griega *kīnētos*, que significa ‘móvil’. La kinesina, como dijimos antes, transporta carga. Uno de sus extremos, que identificaremos como la cabeza, es el que la liga a otras moléculas, o sea, el que lleva la carga. En el otro extremo, que correspondería a los pies, hay dos porciones bien diferenciadas que se alternan en su movimiento (de la misma manera en que un caminante alterna sus pies al caminar), lo cual da lugar a una caminata a lo largo de los microtúbulos.

¿Cómo logra desplazarse la kinesina? Debe convertir energía almacenada en fuerzas que muevan sus pies por el microtúbulo. La energía la consigue de las moléculas de adenosín trifosfato (ATP), que se mueven por la célula para actuar como combustible del proceso. La mayor parte de los procesos biológicos obtienen energía a través del ATP. La ligadura del ATP a la kinesina produce un cambio en la forma de esta última que le permite levantar uno de sus pies y moverlo hacia adelante.

La molécula de ATP ligada reacciona químicamente (hidrólisis) para convertirse en adenosín difosfato (ADP), que es liberado. Al estar desligada del ATP, la kinesina vuelve a su forma inicial y el pie levantado vuelve al camino tubular. De esta forma se produce un paso hacia adelante. Luego el ciclo se repite, pero con el otro pie, para dar el siguiente paso y así sucesivamente.

Una gran parte de este proceso es conocida gracias a experimentos químicos en los que se miden velocidades de reacción o la relación entre niveles de ATP y movimiento, por ejemplo. Pero la aparición, en 1986, de la pinza óptica,⁴ que hizo posible fijar o seguir el movimiento de objetos dieléctricos microscópicos, permitió otro tipo de experimentos, como el que realizaron en 1993 Svoboda y Block⁵ en la Universidad de Harvard: ellos ligaron esferas de poliestireno a kinesinas.

En forma natural la kinesina tiende a desplazarse a lo largo del microtúbulo, pero al estar sujeta por una trampa óptica no puede moverse. Sin embargo, continúa ejerciendo una fuerza que puede medirse usando el desplazamiento de la esfera de vidrio o poliestireno, a partir del centro de la trampa óptica, ya que dicha trampa sujeta la esfera como si fuera un resorte lineal. De esta forma, se pudo determinar la fuerza que ejerce la kinesina, que es del orden de 5 piconewtons, equivalente al peso de la mitad de la millonésima parte de la millonésima parte (5×10^{-11}) de 1 k. No obstante esto, los detalles bioquímicos del funcionamiento de la kinesina, así como el del resto de los motores moleculares, están todavía lejos de ser develados.

Por otra parte, hemos pasado por alto que la kinesina, como proteína, está inmersa en un mundo en el que las escalas significativas son del orden de un nanómetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Este mundo, al que llamaremos "mundo nano", se caracteriza por ser inquieto y turbulento. Esto no se refleja en la descripción que hicimos antes, que podría corresponder a alguna máquina macroscópica en la que la interacción con el medio circundante es, en general, despreciable.

MOVIMIENTO BROWNIANO

Tan pronto como el pie de la kinesina se levanta, es golpeado por las moléculas de agua que lo rodean. Esto lo obliga a desplazarse con movimiento browniano. El movimiento browniano debe su nombre a Robert Brown, un famoso botánico escocés, amigo de Charles Darwin, que observó por primera vez a través del microscopio el movimiento de las partículas de polen en el agua.⁶ Dentro de los granos de polen visibles hay miles de partículas de polen de un radio aproximado de la milésima parte de un milímetro; o sea, tan pequeñas que solo pueden ser vistas a través del microscopio. Brown esperaba que las partículas de polen reposaran en el agua como hojas en un lago, de modo que le sorprendió lo que vio: las partículas se movían con saltos espasmódicos, en direcciones variables, como arrastradas por un huracán microscópico. Lo primero que pensó fue que esta extraña danza era una manifestación vital de las partículas de polen. Pero, al probar con otras partículas microscópicas extraídas de la arena o de distintos minerales, observó el mismo comportamiento. En conclusión, el tamaño de las partículas hace que se vean sometidas al bombardeo de las moléculas de agua que las rodean y describan ese movimiento que, años más tarde, se conoció como browniano. Con todo, para llegar a esta explicación hubo que esperar las contribuciones de Maxwell, Boltzmann y, finalmente, en 1905, el famoso trabajo de Einstein en el *Annus mirabilis* para la física.⁷

Al igual que las partículas de polen, una vez que el pie de la kinesina se levanta, se ve sujeto a impulsos en cualquier dirección que causan que se desplace en forma errática. Esto provoca que, cuando se vuelve a apoyar en el microtúbulo, haya dado uno o varios pasos adelante o uno o varios pasos atrás.

Experimentos asociados con el movimiento browniano en motores moleculares fueron realizados por un grupo de investigadores liderado por Toshio Yanagida en la Universidad de Osaka.⁸ Los experimentos se llevaron a cabo con otros motores proteicos importantes: las miosinas, que actúan sobre las fibras de actina de los músculos esqueléticos y logran que se contraigan y actúen sobre los tendones para lograr el movimiento. Incluso se llegó a detectar y medir los pasos que una miosina realiza sobre una fibra de actina. Yanagida y su grupo observaron que, en el momento en que la miosina absorbe una molécula de ATP, no da necesariamente un solo paso sobre la fibra: puede dar dos, tres o más pasos. Puede también dar pasos hacia atrás. La miosina parece ejecutar los pasos de una danza casi aleatoria. El grupo de Yanagida⁹ observó con posterioridad kinesinas desplazándose por el microtúbulo con movimientos espasmódicos compuestos por pausas aleatorias, saltos variables y algún paso atrás.

¿CÓMO FUNCIONAN LOS MOTORES MOLECULARES?

Los motores moleculares parecen funcionar de manera muy distinta a cómo funciona la mecánica de relojería, según la cual se absorbe un ATP, la miosina da un paso, se actúa sobre una fibra de actina. Otro ATP, otro paso, otra acción, y así siguiendo. Esto sucede con las máquinas a las que estamos acostumbrados, como el motor de nuestro auto, en el que el pistón se mueve comprimiendo y expandiendo el volumen en un cilindro, lo que es transmitido al árbol de levas en forma repetida para generar un ciclo continuo.

Un problema al que se enfrentan los investigadores es el de comprender cómo actúa la termodinámica en estas máquinas microscópicas. La termodinámica tuvo sus inicios en el siglo XIX gracias a Sadi Carnot, quien descubrió que toda máquina transforma energía de una forma a otra con un límite en la eficiencia máxima posible que no depende de la tecnología o del combustible utilizados, sino de cantidades fundamentales como el calor y la temperatura.

Kelvin y Clausius extendieron esta regla, aplicable solamente a las máquinas, a todos los procesos posibles en los que se convierte energía calórica en trabajo: reacciones químicas, procesos biológicos o transformaciones internas de las estrellas. De esta forma surgieron las leyes de la termodinámica.

La primera ley postula que la energía no puede ser creada ni destruida, sino solamente transformada. La segunda pone límites a la transformación de la energía. Clausius llamó **entropía** a la variable asociada a la segunda ley. En términos de la entropía, la segunda ley postula que esta no puede disminuir en ningún proceso espontáneo o cambio natural. En un proceso irreversible, como la rotura de un huevo, la entropía inicial del huevo entero es menor que la entropía final del huevo roto.

Más adelante, a partir de la teoría cinética de los gases de Maxwell, en la que este introduce la idea de una distribución probabilística de energías, Boltzmann proporciona una interpretación de la entropía en términos de probabilidades. De acuerdo con esta interpretación y desde el punto de vista de la mecánica estadística, la entropía es una medida del número de formas en que un sistema se puede presentar y se toma como una medida de desorden (más alto el desorden, mayor la entropía). Así se entiende por qué la entropía aumenta cuando se rompe un huevo y también por qué las habitaciones tienden a desordenarse fácilmente con el simple paso del tiempo, pero hay que hacer un esfuerzo para mantenerlas ordenadas.

Los padres de la termodinámica llegaron a sus leyes considerando sistemas macroscópicos que se describen en términos de cantidades promedio, como la presión y la temperatura, lo cual es razonable si se piensa en las grandes máquinas de vapor de la época victoriana.

Un motor molecular es del orden de unos pocos nanómetros y está compuesto de unas pocas decenas de miles de átomos. Como consecuencia, está sometido a fluctuaciones de energía enormes que lo obligan a describir caminos aleatorios, como encontró Brown en el siglo XIX y, más recientemente, Yanagida y sus colegas con la miosina o la kinesina.

Pero es evidente que tanto la miosina como la kinesina o el resto de los motores moleculares logran cumplir su función, a pesar de tener que realizarla en el ambiente turbulento en el que están inmersos, para que las células se organicen y la vida sea posible. La naturaleza no solo encontró la forma de convertir energía en trabajo —lo que logramos nosotros en el siglo XIX con la Revolución Industrial—, sino que además resolvió cómo hacerlo en presencia del bombardeo continuo y aleatorio que produce el movimiento browniano. La solución que tomó la naturaleza no consistió en luchar contra la aleatoriedad del movimiento, sino en encontrar la forma de usarla.

La aleatoriedad no es siempre perfecta. Es conocida la rotación de los *croupiers* en los casinos para evitar que las tendencias asociadas a las características de estos puedan ser aprovechadas por los jugadores. Por otro lado, los casinos obtienen grandes ganancias de los juegos de azar. ¿Cómo lo logran? Si bien cada tanto aparece un jugador que se lleva una buena ganancia, los casinos modifican las probabilidades para que, en el largo plazo, haya un flujo neto de dinero de los bolsillos de los jugadores a sus arcas. Ahora veamos qué pasa físicamente.

EL MODELO “RATCHET”

En el capítulo 46 de su *Lectures on Physics*,¹⁰ Richard Feynman usa un dispositivo para demostrar que no se puede obtener mayor eficiencia que la de Carnot, como ilustración de la segunda ley de la termodinámica. El dispositivo está compuesto por un eje con paletas en un extremo y una rueda dentada o matraca

("ratchet" en inglés) en el otro, con un tope que solo le permite girar en una dirección. Ambos extremos están sumergidos en un gas a la misma temperatura. El bombardeo de las moléculas de gas sobre las paletas producirá en estas un movimiento de rotación browniano, es decir que hará girar el eje en ambos sentidos aleatoriamente. Pero la matraca del otro lado permite la rotación en una sola dirección o, dicho de otro modo, impide la rotación en uno de los dos sentidos. De esta forma se lograría que la rueda gire en una sola dirección y podría ejercer un trabajo para levantar un peso pequeño. Este proceso viola la segunda ley de la termodinámica que, en una de sus formas, expresa la imposibilidad de convertir energía térmica (la presión aleatoria en forma de choques de las moléculas de gas sobre las paletas) en trabajo con una sola fuente térmica (el gas a la misma temperatura en las paletas y en la matraca del otro lado). Si esto fuese posible, estaríamos en presencia de un móvil perpetuo y ¡habríamos resuelto el problema mundial de la energía! La paradoja se resuelve considerando la acción de las moléculas de gas sobre la matraca. Tanto esta como el tope que impide el giro en un sentido están sometidos también al bombardeo molecular aleatorio que provocará que el tope eventualmente se suelte y la rueda gire en el sentido contrario impidiendo la posibilidad de realizar un trabajo. Si se usa gas a dos temperaturas distintas en cada uno de los extremos del eje, se puede lograr que el eje gire más en una dirección que en la otra y, de esta forma, será posible levantar un peso. Esto se logra porque la temperatura es mayor en las paletas que en la rueda dentada. La eficiencia de conversión de la energía térmica en trabajo es la de la ley de Carnot.¹¹

Este dispositivo de matraca o ratchet, que ya había sido propuesto por Marian Smoluchowski mucho antes de que Feynman lo hiciera,¹² atrajo la atención de los biofísicos que, a partir del trabajo de Andrew Huxley de 1957,¹³ propusieron mecanismos en los que los motores moleculares hacían uso de la considerable energía térmica disponible a temperaturas fisiológicas.

Un ejemplo es el artículo de 1990 de Ronald Vale y Fumio Oosawa¹⁴ en el que se propone directamente un modelo para motores moleculares como el de Feynman con dos temperaturas distintas. Esto permitiría obtener desplazamiento sin violar la segunda ley.

Si bien la variación de temperatura fue introducida de forma ad hoc por Vale y Oosawa,¹⁵ en un trabajo de 1996, Zhou y Chen demostraron que puede obtenerse un efecto equivalente al de dos temperaturas a través de la hidrólisis del ATP.¹⁶ En 1993 aparece en las revistas de física la primera propuesta teórica de empleo de la matraca de Feynman para obtener trabajo o corriente neta, en un trabajo del físico argentino Marcelo Magnasco en la Universidad Rockefeller, en Estados Unidos. En este trabajo se logra una corriente neta, es decir que, en promedio, la rueda dentada gira más en una dirección que en la otra, con una sola fuente térmica.¹⁷ Este trabajo tuvo gran impacto en la comunidad científica debido a que reproduce las condiciones de los motores moleculares al trabajar con una sola fuente de temperatura, ya que estos se mueven en la célula en la que la temperatura es uniforme. Sin embargo, vimos anteriormente que la segunda ley de la termodinámica impide la corriente neta o el trabajo en sistemas aislados a temperatura uniforme. Para obtener la corriente neta, Magnasco le agregó al ratchet de Feynman una fuerza externa oscilatoria de media nula con la que lograr la corriente neta sin contradecir la segunda ley, ya que el sistema deja de estar aislado. De esta forma, se dio inicio en física a una línea muy importante de investigación, muy activa hasta el presente, relacionada con lograr corriente neta o trabajo a través de las fluctuaciones que caracterizan el movimiento microscópico.¹⁸

Además, se han desarrollado otras aplicaciones importantes dentro de esa línea de investigación de transporte neto en ausencia de una fuerza neta aplicada, tales como el transporte de átomos de baja energía (llamados fríos) en redes ópticas, el control del movimiento de vórtices en dispositivos semiconductores y la separación de partículas a escala micro.

A pesar de que ya en el trabajo de Magnasco se establece la base para entender el movimiento de los motores moleculares (porque con fluctuaciones térmicas como las del interior de la célula se logra corriente), es en un trabajo posterior en el que se da un paso adicional importante en esta dirección, dado que se modela el intercambio de ATP por parte de los motores moleculares.

En 1994 Dean Astumian y Martin Bier, en la Universidad de Chicago,¹⁹ consideraron una partícula sometida al movimiento browniano bajo el efecto de una fuerza que se apaga y se prende de forma intermitente. Esta fuerza intermitente representa en forma simplificada la forma en que la energía asociada al pie de la kinesina cambia con la absorción y reacción del ATP: cuando el ATP se liga a la kinesina, la fuerza atractiva entre el pie y el microtúbulo se anula y el pie, por lo tanto, se levanta. En la otra fase el ATP se hidroliza, convirtiéndose en ADP, y se desliga; la fuerza de atracción aparece y el pie vuelve a apoyarse. La fuerza es asimétrica, es decir, es más fuerte en una dirección que en otra, como la matraca o ratchet de Feynman, y por eso este modelo es considerado tipo ratchet. De esta manera son más probables los pasos hacia adelante que hacia atrás y, en promedio, después de muchos pasos se logra una corriente neta en una dirección. Como mostraron los experimentos de Yanagida y Svoboda, ocasionalmente tanto la miosina

como la kinesina dan pasos atrás o varios pasos adelante, pero finalmente logran transportar la carga. Las predicciones del modelo de Astumian y Bier coincidieron en este sentido con los resultados experimentales.

Posteriormente se desarrollaron modelos mucho más complejos en los que se presta más atención a la interacción del motor molecular con el camino, lo que da como resultado fuerzas que dependen de la posición y también de la deformación del motor. Un ejemplo de este tipo de modelos es el propuesto para la miosina en su desplazamiento sobre un filamento de actina en el trabajo de Mitsunori Takano, Tomoki P. Terada y Masaki Sasai,²⁰ en el que se llega a un muy buen acuerdo con los experimentos realizados en él. Es importante señalar que, a pesar de que se trata de un modelo mucho más detallado que el de Astumian y Bier, conserva la esencia de ese modelo anterior, ya que, cuando el motor está desligado del filamento de actina, presenta movimiento browniano y, por otro lado, las fuerzas que experimenta cuando se desplaza sobre el filamento son asimétricas. Por lo tanto, se lo sigue considerando un modelo tipo ratchet como el que introdujeron Feynman y Magnasco.

Otro efecto importante que debe tenerse en cuenta es que con frecuencia el mismo filamento es transitado simultáneamente por muchas proteínas motoras, y las interacciones entre motores pueden producir perturbaciones en el transporte. Se ha determinado que los defectos en el transporte en el citoesqueleto están relacionados con muchas enfermedades, tales como la enfermedad de Alzheimer o la enfermedad de la motoneurona. Por ejemplo, problemas en el transporte de mitocondrias están asociados a la esclerosis múltiple, así como el transporte defectuoso de ARN se asocia con la atrofia del músculo espinal. En la enfermedad de la motoneurona se observa una acumulación masiva de kinesina en los axones de la médula espinal.

Con el objeto de colaborar con la comprensión del congestionamiento y otros problemas asociados con el transporte citoesquelético, se ha trabajado recientemente con simulación computacional de modelos tipo ratchet de un tipo especial de kinesina, la KIF1A, y se ha logrado detectar el cambio de fase entre zonas de distinto grado de congestión de tráfico.²¹

NANOMÁQUINAS

En 1959, en una conferencia titulada “There Is Plenty of Room at the Bottom” (“Hay mucho espacio en el fondo”),²² Richard Feynman propuso, entre otras cosas, la miniaturización de las computadoras, que entonces ocupaban cuartos enteros, y además expuso algunos de los principios básicos que físicos e ingenieros debían considerar para construir máquinas a escala nano. Cincuenta años más tarde se ha logrado reducir las computadoras siguiendo de forma asombrosa la ley de Moore (de 1965),²³ que expresa que aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un circuito integrado.

Con respecto a la construcción de una máquina a escala nano, si bien estamos lejos del desarrollo alcanzado en las computadoras, algunos logros tecnológicos recientes parecen indicar que podemos cumplir con ese objetivo en unos años. Un equipo de la Universidad de Groningen construyó en 2005 un motor molecular rotatorio que trabaja sobre la base de reacciones químicas.²⁴ Este motor consiste en una estructura de dos partes flexibles unidas por una ligadura de carbono. Se genera un movimiento de rotación unidireccional a través de reacciones químicas que rotan una parte con respecto a la otra, y la forma de la molécula impide que se produzca la rotación inversa. El movimiento consta de cuatro pasos, cada uno con su correspondiente aditivo químico. El problema es que no es fácilmente reproducible porque para funcionar necesita mucha precisión en las cantidades de químicos y en los tiempos de alimentación.

En el mismo año 2005, en el Instituto Max Planck de Stuttgart, se construyó un nanopéndulo.²⁵ Para ello, se utilizó un nanotubo de carbono: un cilindro de alrededor de dos nanómetros de diámetro, al que se colgó una masa de metal de peso aproximado a la diez millonésima de millonésima de kilo, y se observó la oscilación del péndulo sometido al bombardeo de las moléculas del medio.

Otra posibilidad que se ha explorado es usar una combinación de motor biológico con partes artificiales. En el año 1999, en la Universidad de Cornell, se utilizó la proteína ATP sintasa, que es un motor rotatorio, junto con un “nanopropulsor” de níquel de alrededor de una milésima de milímetro de largo para lograr un “cyborg” propulsor rotatorio.²⁶

La construcción de máquinas a escala nano es una tarea que la naturaleza ha perfeccionado a lo largo de varios millones de años. Habiendo pasado medio siglo desde la propuesta de Feynman, se ha logrado conocer cómo trabajan las máquinas moleculares biológicas y se ha comenzado a usar ese conocimiento para crear prototipos de máquinas moleculares artificiales. Sin embargo, en este sentido podemos decir, parafraseando a Feynman, que todavía “hay mucho espacio en el fondo”.

NOTAS

1. Purcell, E. M. (1977). "Life at low Reynolds number", *American Journal of Physics*, 45(1), pp. 3-11.
2. *Ibid.*
3. Vale, R. D. (1987). "Intracellular transport using microtubule-based motors", *Annual Review of Cell Biology*, 3, pp.347-378.
4. Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E. y Chu, S. (1986). "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", *Optic Letters* 11(5), pp. 288-290.
5. Svoboda, K. y Block, S. M. (1994). "Force and velocity measured for single kinesin molecules", *Cell* 77(5), 773-784.
6. Brown, R. (1828). "On particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies", *Philosophical Magazine*, 4, pp. 161-173.
7. Einstein, A. (1905). "On the motion of small particles suspended in a stationary liquid, as required by the molecular kinetic theory of heat" ("Über die von der molekularinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen"), *Annalen der Physik* 17(8), pp. 549-560.
8. Kitamura, K., Tokunaga, M., Iwane, A. H. y Yanagida, T. (1999). "A single myosin head moves along an actin filament with regular steps of 5.3 nanometres", *Nature* 397, pp. 129-134.
9. Nishiyama, M., Muto, E., Inoue, Y., Yanagida, T. y Higuchi, H. (2001). "Substeps within the 8-nm step of the ATPase cycle of single kinesin molecules", *Nature Cell Biology* 3, pp.425-428.
10. Feynman, R., Leighton, R. y Sands, M. (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
11. Léase también el artículo de Juan Parrondo y Pep Español en el que se corrige una hipótesis del planteo original para la obtención de la eficiencia. Parrondo, J. y Español, P. (1996). "Criticism of Feynman's analysis of the ratchet as an engine", *American Journal of Physics* 64(9), pp. 1125-1129.
12. Smoluchowski, M. (1912). "Experimentally demonstrable molecular phenomena, which contradict standard thermodynamics" ("Experimentell nachweisbare der üblichen Thermodynamik widersprechende Molekularphanomene"), *Physikalische Zeitschrift* 13, pp. 1069-1080.
13. Huxley, A. F. (1957). "Muscle structure and theories of contraction", *Progress in Biophysics and Biophysical Chemistry* 7, pp. 255-318.
14. Vale, R. y Oosawa, F. (1990). "Protein motors and Maxwell's demons: does mechanochemical transduction involve a thermal ratchet?", *Advances in Biophysics* 26, pp. 97-134.
15. *Ibid.*
16. Zhou, H. X. y Chen, Yd. (1996). "Chemically driven motility of Brownian particles", *Physical Review Letters* 77(1), pp. 194-197.
17. Magnasco, M. (1993). "Forced thermal ratchets", *Physical Review Letters* 71(10), p. 1477.
18. Astumian, R. D. y Hänggi, P. (2002). "Brownian Motors", *Physics Today* 55(11), pp. 33-39.
19. Astumian, R. D. y Bier, M. (1994). "Fluctuation driven ratchets: Molecular motors", *Physical Review Letters* 72(11), pp. 1766-1769.
20. Takano, M., Terada, T. P. y Sasai, M. (2010). "Unidirectional Brownian motion observed in an in silico single molecule experiment of an actomyosin motor", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(17), pp. 7769-7774.
21. Sparacino, J., Lamberti, P.W. y Arizmendi, C. M. (2011). "Shock detection in dynamics of single-headed motor proteins KIF1A via Jensen-Shannon divergence", *Physical Review E* 84, 041907.
22. Feynman, R. P. (1960). "There's plenty of room at the bottom", *Engineering and Science* 23(5), 22-36.
23. Moore, G. E. (1965). "Cramming more components into integrated circuits", *Electronics* 38(8), pp. 114-117.
24. Fletcher, S. P., Dumur, F., Pollard, M. M. y Feringa, B. L. (2005). "A reversible, unidirectional molecular rotary motor driven by chemical energy", *Science* 310(5745), pp. 80-82.
25. Meyer, J. C., Paillet, M. y Roth, S. (2005). "Single-molecule torsional pendulum", *Science* 309(5740), pp. 1539-1541.
26. Montemagno, C. y Bachand, G. (1999). "Constructing nanomechanical devices powered by biomolecular motors", *Nanotechnology* 10(3), p. 225

Constancio Miguel Arizmendi es doctor en Física por la Universidad Nacional de La Plata y profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Codirige el grupo de investigación en Mecánica Estadística y Física No Lineal de esa Universidad y es director del proyecto Dinámica de Sistemas Complejos Fuera del Equilibrio.

MECANIZACIÓN DE LA COSECHA DEL OLIVAR:

ÚNICA ALTERNATIVA ECONÓMICAMENTE SUSTENTABLE EN LA PRODUCCIÓN DEL ACEITE DE OLIVA

INTRODUCCIÓN

EL MERCADO MUNDIAL DEL ACEITE DE OLIVA

La producción mundial de aceite de oliva viene incrementándose de manera sostenida desde 1970. Los países de la cuenca del mediterráneo son los principales productores en el mundo y también los primeros exportadores y consumidores de dicho producto.

El primer lugar lo posee la Unión Europea, que produce entre el 70 y el 77% del total mundial, siendo España e Italia los dos primeros productores, Grecia el tercero y luego Portugal. Francia ocupa el quinto lugar, pero con un volumen muy pequeño respecto de su antecesor.

Los restantes países de dicha cuenca mediterránea, como Túnez, Marruecos, Argelia (África) y Turquía y Siria (Asia) producen entre el 20 y el 25% del total mundial.

Argentina es el décimo productor mundial y el primero en América, pero su volumen, aproximadamente el 1% del total mundial, está muy lejos de los primeros puestos. El consumo es muy bajo (se estima en 140 mililitros por año por habitante, comparado con 13 litros en España), por lo que queda un saldo exportable bastante alto. El resto de los países americanos productores son Chile, Uruguay, Estados Unidos y Perú, con volúmenes muy pequeños. En Oceanía, Australia es el principal productor, con aceites de muy buena calidad, pero con una cantidad que no alcanza a satisfacer el mercado interno.

Los principales países importadores son Japón, Canadá, Estados Unidos, Rusia, China, Australia y también los países de la Unión Europea no productores.

El precio del aceite de oliva está determinado por la producción de los países de la Unión Europea, que a su vez ha fijado para la comercialización estándares bien definidos sobre la base de distintas calidades, cualidades y sabores, de forma que cada uno sepa con claridad qué está comprando y vendiendo. En general, el aceite de oliva de exportación se comercializa embotellado en origen.

Luego de haber experimentado su piso en el año 2012, y debido a una gran sequía en España, el precio del aceite de oliva comenzó a subir a partir del 2013. En el 2014 registró una meseta en su promedio histórico para volver a subir prometedoramente durante el primer semestre del 2015.

CARACTERÍSTICAS DE SU PRODUCCIÓN

El aceite de oliva extravirgen se obtiene únicamente por prensado del fruto del olivar (sin el empleo de solventes). Esta técnica se ha utilizado desde la antigüedad en forma ininterrumpida.

Tradicionalmente, el olivar se cosechaba a mano. Para poder obtener un aceite de alta calidad, el molido del fruto y la elaboración del aceite deben llevarse a cabo pocas horas después de la cosecha. Por esta razón, las fincas medianamente importantes deben encargarse ellas mismas de la producción industrial de su propio aceite. Por lo general, la planta industrial (comúnmente llamada almazara) se instala en la misma finca.

La técnica de fabricación consiste básicamente en el lavado y molido del fruto y la elaboración de una pasta que luego es prensada y de la que se obtiene una mezcla de agua y aceite que, convenientemente separada y decantada, da origen al aceite denominado extravirgen.

La elaboración del aceite, que hemos descrito concisamente, es un proceso que se realiza con máquinas modernas y de alta tecnología, provistas por grandes empresas, en general, de origen europeo.

Lo que aún se desarrolla, no pocas veces, con baja tecnología es la cosecha del olivar, que —como veremos— es un proceso antieconómico que atenta contra la sustentabilidad de la explotación, a menos que se realice en forma mecánica y con alta tecnología, lo que permite reducir los costos de manera notable.

Para comprender esto, analicemos brevemente la cadena de valor del aceite de oliva.

CADENA DE VALOR DEL ACEITE DE OLIVA

Para la elaboración de este trabajo, se tomaron los datos de la explotación de la finca Palas Atenea, localizada en Aimogasta, provincia de La Rioja, en el noroeste argentino, correspondientes al año 2014. Pero los datos pueden considerarse representativos de cualquier finca argentina y pueden extrapolarse —como podremos ver— a explotaciones de Europa y Oceanía.

CARACTERÍSTICAS DE LA FINCA

La finca cuyos datos fueron analizados se denomina Palas Atenea¹ y está ubicada en el kilómetro 1160 de la Ruta 60, en la localidad de Aimogasta, departamento Arauco, de la provincia de La Rioja (Argentina).

En ella se realiza:

-Explotación agrícola: producción de aceitunas para aceite de las variedades arbequina, frantoio y coratina.

-Explotación industrial: producción de aceite de oliva extravirgen, embotellado y comercialización a través de un canal de ventas propio.

Características del suelo y del clima en Aimogasta: el clima es árido, con veranos muy calurosos e inviernos benignos a una altitud de 850 msnm.

Extensión de la explotación: 224 ha implantadas.

Distribución de las variedades:

- Lote 1: 56 ha de arbequina 99.
- Lote 2: 56 ha. de frantoio.
- Lote 3: 56 ha de arbequina 01.
- Lote 4: 56 ha de coratina.

Cantidad de plantas: 53 000.

Características de la inversión: inversión efectuada en el marco de la ley 22021 de promoción agrícola.

Año de inicio de la inversión: 1997 (En el marco de la ley de promoción se implantaron unas 20 000 ha de olivos en la provincia de La Rioja).

Años para inicio de producción de aceitunas: 7 años.

Características de la explotación:

- Riego: por goteo.
- Extracción de agua: por pozo a 400 metros de profundidad (dos pozos en actividad).
- Nutrientes a las plantas (agroquímicos): en el riego.
- Cosecha: manual.

Personal ocupado permanente: 13 personas.

Personal temporario para poda: aproximadamente 20 personas.

Personal para cosecha: alrededor de 250 personas.

Rinde promedio esperado a plena producción: 10 000 kg/ ha.

RIESGOS A LOS QUE ESTÁ EXPUESTA LA EXPLOTACIÓN

Los riesgos a los que está expuesta la explotación tienen dos orígenes:

Climatológicos

- Heladas tardías (El olivo es muy sensible al frío).
- Piedras.
- Calores intensos (viento zonda).

Propios del olivo

- Año becerero: es un año caracterizado por una baja producción de fruta sin que medie ningún motivo aparente. Por lo general, sucede después de un año con alta producción.
- Enfermedades propias del olivo.

Gastos sin cosecha

Los insumos principales por campaña, sin incluir los gastos propios de la cosecha, para 224 ha de olivos son:

- Jornales del personal permanente.
- Jornales del personal temporario (fundamentalmente en la época de poda).
- Agua para riego (se utilizan 51 740 000 litros de agua, que implican el uso de 1 700 000 kW de energía).
- Nutrientes (55 000 kg de nutrientes para el olivo que se introducen en el agua de riego).

Todo esto da como resultado la siguiente estructura de gastos, reflejada en la Tabla 1:

Tabla 1. Gastos sin cosecha

Rubro	% sobre el total
Mano de obra	63,32
Energía	10,5
Reparaciones y mantenimiento	9,13
Agroquímicos	8,81
Combustibles y lubricantes	4,52
Total	100

Gastos de cosecha: En la cosecha manual del olivar, se paga al operario por cajón recolectado. Esto implica un costo por kilogramo de aceituna de USD 0,26/kg cosechado (valor estimado para la campaña 2015).

Si se toma en cuenta que el kilogramo de aceituna se comercializa a USD 0,35, tenemos que el costo de la cosecha equivale al 60% del valor de la aceituna, lo que es insostenible desde el punto de vista económico y hace que la producción de aceite de oliva no sea sustentable.

Explotación industrial: En la gran mayoría de las fincas la extracción del aceite de oliva se realiza en el mismo establecimiento, ya que para obtener un aceite de calidad extravirgen, este debe obtenerse solamente por prensado (sin la utilización de solventes) a las pocas horas de cosechado el fruto.

En nuestro caso, para la obtención del aceite se utilizó un equipo Pieralisi (de origen italiano) y se lo almacenó en tanques de acero inoxidable para su decantación y posterior envasado.

El rinde promedio de aceite en la zona para cada variedad es:

- Arbequina y frantoio: 14%.

- Coratina: 18%.

Con lo que se obtiene un rinde promedio de la explotación del 15% (kg de aceite/kg de aceitunas).

VALOR AGREGADO POR LA INDUSTRIA

El valor internacional del aceite a granel es de USD 3000 por tonelada. Podemos entonces concluir que el valor agregado por la industria se puede determinar de la siguiente manera:

Teniendo en cuenta que el valor del kilogramo de aceituna para producir aceite es de USD 0,35 por kilogramo, es decir, USD 350 por tonelada, y que el rinde promedio de la explotación es de un 15%, se calcula que por cada tonelada de aceituna nos quedarán unos 150 litros de aceite de calidad extravirgen.

Por otro lado, el costo estimado de la transformación es de unos USD 280 para producir una tonelada de aceite (USD 42/tonelada de aceituna), mientras que esa tonelada de aceite puede venderse en el mercado a USD 450, quedando por lo tanto una ganancia neta de USD 58, como puede verse en la Tabla 2, que resume lo que hemos indicado.

Valor agregado por la industria por tonelada de aceituna	USD
Valor del aceite obtenido	450
Costo de la tonelada de aceituna	350
Costo de la transformación	42
Valor agregado por la industria neto	58
Datos	
Rinde de aceite por tonelada de aceituna	150 litros (15%)
Precio de la tonelada de aceite	USD 3000

Tabla 2. Valor agregado por la industria por tonelada de aceituna

Como conclusión, sacamos que el valor agregado por la industria es solamente del 16,58%, valor exiguo que hace insostenible la explotación.

MECANIZACIÓN DE LA COSECHA DEL OLIVAR

La única alternativa para reducir costos en la cadena de valor es la mecanización de la cosecha. Desde hace varios años se ha estado trabajando al respecto. En la actualidad, los pequeños productores utilizan herramientas manuales para el vibrado de ramas (de reconocidas marcas como Stihl®, Honda®, Echo®, etc.) para el derribo del fruto, con baja eficiencia, solo rentables en fincas de tipo familiar.

En explotaciones más grandes se ha introducido el empleo de máquinas vibradoras de tronco (que son originarias de la cosecha de otros frutos, como la castaña) con relativo éxito, ya que, a pesar de ser rápidas, no logran un porcentaje de derribo del fruto superior al 60%.² Entre ellas se pueden citar las marcas Pellenc®, Moresil®, Halcon®, etc.

Las hay de dos tipos: de “paraguas invertido”, que despliegan un manto debajo del árbol, y las de tipo *side-to-side* (lado a lado), que constan de dos partes: el vibrador propiamente dicho y la pantalla, dispuestas a ambos lados del árbol. Estas últimas son las más rápidas y eficientes.

Figura 1. Vibrador de troncos tipo “paraguas invertido” Pellenc®



Mejor eficiencia se ha logrado obtener en olivares jóvenes con el empleo de máquinas viñateras como New Holland® o Gregoire®, que permiten cosechar en los primeros años de producción. Sin embargo, a partir de que el árbol toma cierto porte al convertirse en adulto, la cosecha se torna más dificultosa.

Figura 2. Máquina cosechadora Gregoire®



Recientemente han aparecido (a principios del año 2003) grandes máquinas, como el modelo Colossus® y Colossus S®, de la firma argentina MaqTec®, que permiten cosechar el olivar adulto, de cualquier porte, con gran variedad de estilos de poda y obtener porcentajes de derribo de frutos cercanos al 85%.

Un gran porcentaje de los olivares de Australia se cosecha con este tipo de maquinaria, que también ha sido introducida con éxito en la península ibérica (España y Portugal).³



Otras empresas (Braud® y la francesa Gregoire®) han desarrollado maquinarias similares para la cosecha lateral del olivar adulto con resultados semejantes.^{4 5}

El costo promedio del kilogramo de aceituna cosechado en forma mecánica (cualquiera de los detallados más arriba), considerando los gastos en jornales, combustibles, lubricantes y mantenimiento de la maquinaria, es de (valores estimado para la cosecha 2015):^{6 7} USD 0,08 en plantaciones con rinde promedio (10 000 kg/ha). Este valor puede incrementarse algo con rindes magros por hectárea.

Figura 3. Cosechadora Colossus XL®

Figura 4. Cosechadora Colossus S®

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La mecanización de la cosecha es la única alternativa sustentable para la producción de aceite de oliva en el mundo, tal como puede deducirse de un análisis de los costos de cada kilogramo cosechado.

El encarecimiento de la mano de obra y la obligación en el cumplimiento estricto de las leyes laborales hacen que la cosecha manual del olivar no sea rentable desde hace ya algunos años.

NOTAS

1. Datos cedidos por la finca Palas Atenea, propiedad de la firma Essen Aluminio S.A.
2. Ravetti, L. y Robb, S. (2010). "Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems", *Advances in Horticultural Science* 24(1), pp. 71-77.
3. "Mecanización del Olivar - España / Australia" (2010). Recuperado de http://www.maqtec.com/noticias/blog_post.php?id=167
4. Sola Guirado, R. R., Gil-Ribes, J. A., Blanco-Roldán, G.L. et al. (2013). "Desarrollo de una cosechadora integral para el olivar tradicional".

VII Congreso Ibérico de Agroindustria y Ciencias Hortícolas. Madrid.

5. Gil Ribes, J. A., Blanco Roldán, G. L. y Castro García, S. (2012). "El futuro del olivar tradicional y de su recolección", *Vida Rural* 345, pp. 30-38.
6. AEMO (2012). "Aproximación a los costes del cultivo del olivo". En *Cuaderno de conclusiones del seminario AEMO*. Recuperado de http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Estudio_2012.pdf
7. Bueno Grimalt, L.A. (2015). "Modelos de cultivo de olivo. Efecto sobre el crecimiento, la producción y la cosecha mecánica". *Documentos del INTA*.

Jacinto Diab es profesor titular en la Universidad Tecnológica Nacional y en la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

Reinaldo Leuci es ejecutivo de la empresa Essen Aluminio S.A. y presidente de Palas Atenea. Es también profesor de posgrado en la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

DR. AURELIO FERNÁNDEZ
BARIVIERA

ECONOFÍSICA: LA FÍSICA DE LOS MERCADOS FINANCIEROS

INTRODUCCIÓN

Desde hace ya más de una década ha venido ganando fuerza una nueva disciplina, llamada econofísica, que utiliza técnicas y paradigmas propios de la física estadística y teórica y los aplica a sistemas económicos. Fue el profesor H. E. Stanley, editor jefe de la prestigiosa revista *Physica A*, quien allá por 1996, la bautizó con este nombre. Desde esa fecha hasta aquí el crecimiento de la literatura en econofísica ha sido exponencial. En gran parte este incremento es debido a la disponibilidad de datos de mayor frecuencia y a la capacidad de procesamiento de dichos datos por medio de las computadoras. Hoy en día podemos encontrar no solamente los datos diarios de cierre o apertura de diferentes mercados financieros, sino también datos intradiarios e incluso datos operación a operación. Se trata de lo que llaman datos de ultra alta frecuencia. Esta enorme cantidad de datos puede llegar a ser del orden de varios *terabytes* (TB) en el caso de las operaciones realizadas durante un año en un mercado como la Bolsa de Nueva York.¹ Manejar tan enorme masa de datos supone, por un lado, un desafío teórico para el desarrollo de nuevos modelos y, por otro lado, un importante problema de procesamiento de los datos para obtener información útil para la toma de decisiones. Se necesitan computadoras con suficiente capacidad de procesamiento y lenguajes de programación versátiles para poder poner en práctica los algoritmos necesarios.

En este artículo proponemos mostrar que la influencia de la física en la economía se ha venido produciendo desde hace muchos años, aunque apenas en las últimas décadas esta nueva disciplina se ha insertado entre la física y la economía con modelos y forma de trabajo propios.

EL EQUILIBRIO DE MERCADO Y LA FÍSICA DEL EQUILIBRIO

Varios economistas notables han sido físicos e ingenieros. Algunos de ellos hicieron licenciatura en física o ingeniería y después se especializaron en economía. Así, Vilfredo Pareto comenzó como ingeniero civil, pero se hizo famoso en economía por las nociones de optimalidad y por el estudio de la distribución de ingresos en una sociedad. Otro ejemplo es Léon Walras, uno de los autores claves en la llamada escuela marginalista, que también era ingeniero. En su caso, utilizó la analogía con nociones de la mecánica clásica para definir el equilibrio de mercado. También apostó por el uso del cálculo infinitesimal en su propuesta de análisis de cantidades marginales.

De todos modos, durante la primera mitad del siglo XX, la economía era una ciencia que se enseñaba de manera cualitativa y no matemática. Es en la segunda mitad de dicho siglo cuando la formali-

zación matemática cobra importancia. Una obra fundamental en la educación de varias generaciones de economistas fue el libro del premio nobel Paul A. Samuelson *Fundamentos del análisis económico*. El *mainstream* del pensamiento económico fue desarrollando una ciencia completamente teórica. Desde entonces, los libros de economía han privilegiado un elaborado formalismo, a expensas del contacto con la observación. En este sentido, mucho tiene que ver un libro publicado por otro famoso economista y también premio nobel. En 1966, Milton Friedman publicó un controvertido ensayo titulado “La metodología de la economía positiva”, un artículo de lectura obligatoria en cualquier curso de metodología de la ciencia en los doctorados en economía a lo largo del mundo. Allí fija las bases de un programa de investigación en economía en el que establece que el realismo de los supuestos es irrelevante. Textualmente dice:

En la medida que pueda afirmarse que una teoría posee ‘supuestos’ y que su ‘realismo’ puede ser considerado independientemente de la validez de las predicciones, la relación entre la importancia de una teoría y el ‘realismo’ de sus ‘supuestos’ es justamente la opuesta de lo que sugiere la opinión criticada. Ciertamente que hipótesis verdaderamente importantes y significativas poseen ‘supuestos’ que no son representaciones descriptivas arbitrariamente inexactas de la realidad y, en general, puede afirmarse que cuanto más significativa es la teoría más irreal serán sus supuestos (en este sentido). La razón es sencilla. Una hipótesis es importante si ‘explica’ mucho con poco, o sea, si abstracta los elementos comunes y cruciales de la masa de circunstancias complejas y detalladas que rodean al fenómeno que va a explicarse y permite unas predicciones válidas. Por lo tanto, una hipótesis para ser importante debe poseer supuestos descriptivamente falsos, ya que no toma en cuenta la mayor parte de las circunstancias reales, puesto que su auténtico éxito reside en mostrar su irrelevancia para explicar el fenómeno de que se trata (pp. 367-368).

El método propuesto por Friedman lleva muchas veces a un divorcio entre la observación de la realidad y la teoría construida académicamente. Dada la influencia de la escuela de Chicago en la formación económica, se entiende que la ciencia económica se haya construido, durante los últimos setenta años, de espaldas a la realidad. Así, supuestos como el comportamiento racional de los agentes económicos, o la construcción de un modelo basado en un “agente representativo”, son moneda corriente de cualquier artículo publicado en revistas económicas.

En este aspecto, la física ofrece muchos ejemplos de una interacción fructífera entre la teoría y la observación. En verdad, tal interacción es esencial. Debemos tener en cuenta que los procesos económicos constituyen sistemas complejos en los que no todas las interacciones son observables y difícilmente medibles. Algunos modelos desarrollados en una rama de la física llamada física estadística permiten incorporar agentes heterogéneos y pensar que hay vida más allá del equilibrio!

Por tanto, la econofísica, como nueva disciplina, pretende tender un puente entre un riguroso modelo teórico y su compatibilidad con la realidad observacional. Dentro de todo el espectro de problemas que abarca la economía, es quizás en las finanzas donde la presencia de los econofísicos se ha hecho más fuerte. Veremos en el resto del artículo un panorama del aporte de la econofísica al conocimiento más profundo de la dinámica de los precios en los mercados financieros.

LA MECÁNICA DE LOS PRECIOS EN LOS MERCADOS FINANCIEROS: LA HIPÓTESIS DEL MERCADO EFICIENTE

Existe una clásica definición en finanzas que dice: “Un mercado es eficiente en sentido informativo si los precios de los activos incorporan toda la información relevante completa e instantáneamente”.

En definitiva, aquí se fijan las bases para explicitar que en un mercado los precios deben reflejar información disponible: la que tenga el operador en forma directa o en forma indirecta. El estudio de la eficiencia informativa de los mercados de valores resulta relevante ya que estos son sistemas que permiten al inversor comprar o vender títulos a precios “justos y equitativos”. Estos precios serán “justos y equitativos”, siempre que el mercado sea eficiente en sentido informativo. Decimos que un mercado es eficiente en sentido débil, si tiene incorporados los precios pasados, lo cual hace imposible obtener rendimientos extraordinarios en base al conocimiento de la serie de precios y rendimientos históricos. Bajo el supuesto de agentes neutrales al riesgo, este subtipo de eficiencia es equivalente a decir que la serie de rendimientos es un paseo aleatorio, lo cual hace completamente imposible la predicción de los rendimientos basados en datos históricos.

La principal implicación de la Hipótesis del Mercado Eficiente (HME) es que es imposible obtener en forma sistemática ganancias extraordinarias a partir del conjunto de información disponible. En otras palabras, no existen estrategias de negociación que permitan obtener rendimientos por encima de los costos de transacción y de la prima de riesgo en forma consistente. Podríamos decir que se trata de una aplicación del principio ricardiano de la ventaja comparativa.² La información que está en poder de todos no puede generar beneficios extraordinarios. Solo las estrategias de negociación basadas en alguna información diferencial (ventaja comparativa) podrían proporcionarnos estas ganancias. Por tanto, el valor de la información depende, de forma inversa, de su dispersión.

Muchas veces se intenta atacar la HME diciendo que tal o cual administradora de fondos ganó más que el promedio del mercado en un determinado año. Sin embargo, si analizamos detenidamente este tipo de información nos damos cuenta de que este tipo de acontecimientos está previsto rigurosamente por la matemática estadística. Si suponemos que una cartera de acciones elegida al azar tiene un 50% de probabilidades de mejorar el índice de mercado en un determinado año, y si suponemos que un individuo elige cada año, durante diez años, una dada cartera, la probabilidad de superar al mercado consistentemente durante esos diez años es de casi 1 entre 1000. Sin embargo, si 2000 individuos eligen al azar carteras durante diez años, es probable que al menos uno mejore el mercado en cada uno de esos diez años.³ Por tanto, el hecho de encontrar algún individuo que mejora el mercado en forma consistente no es necesariamente un indicador de ineficiencia de ese mercado. Simplemente, puede deberse a una cuestión de azar.

LA PROTOTEORÍA DEL MERCADO EFICIENTE

La predictibilidad de los precios y rendimientos de las acciones han suscitado la inquietud tanto de académicos como de inversores desde hace mucho tiempo. Tanto es así que se ha tratado de encontrar patrones o dinámicas de comportamientos de diversa índole.

El primer trabajo del cual se tiene registro sobre el estudio del proceso estocástico que describe el comportamiento de los precios de activos financieros pertenece a un matemático francés llamado Louis Bachelier. Podríamos decir que su tesis doctoral, defendida en el año 1900 constituye el primer compendio de econofísica. Su trabajo no solo realiza un estudio teórico sobre procesos estocásticos, sino también un análisis empírico sobre la dinámica de precios de un bono del gobierno francés y la primera formulación de la teoría del movimiento browniano. El movimiento browniano es un modelo de movimiento aleatorio de una partícula en el espacio. Su nombre se debe al botánico inglés Robert Brown que, en 1828, fue el primero en observar el movimiento continuo e irregular de las partículas de polen en una solución acuosa. Tal movimiento fue interpretado como la consecuencia de los impactos que el polen recibía de las moléculas sujetas a agitación térmica. El estudio del movimiento browniano fue desarrollado en forma independiente por Bachelier en su tesis doctoral de 1900 y por Albert Einstein en uno de los artículos que publicó en 1905, su *Annus mirabilis*.

EL MOVIMIENTO BROWNIANO

Formalmente, el movimiento browniano se define como un proceso estocástico sobre tiempo continuo y variable continua en el cual los cambios consecutivos en la variable Z son estadísticamente independientes y para cambios infinitesimales en el tiempo se verifica que $dz = \varepsilon \sqrt{dt}$ donde $\varepsilon \sim N(0,1)$. En definitiva, lo que implica un movimiento browniano es un proceso sin memoria, en el que el valor que adopta la variable no depende de su valor pasado.

El movimiento browniano estándar es representado por una distribución de probabilidad sobre el conjunto de funciones reales $Z(t)$, $0 \leq t \leq \infty$ con las siguientes propiedades:

- $Z(0) = 0$ con probabilidad 1.
- Para todo $t > 0$ y $a > 0$, los incrementos $Z(t+a) - Z(t)$ son gaussianos con media cero y varianza a .
- $Z(t+a) - Z(t)$ es independiente de $\{Z(s), 0 \leq s \leq t\}$.

EL MODELO DE BACHELIER

El objeto de la tesis de Bachelier era formalizar una expresión que describiera la probabilidad de variación de precios de un instrumento financiero, conociendo su precio de contado. En concreto, construyó un modelo para los precios de unos determinados bonos franceses y estimó las probabilidades de éxito en la especulación con unos derivados *sui generis* de esos bonos, que serían unos productos que se encuentran a medio camino entre los productos financieros llamados *futuros* y *opciones*, que hoy en día se negocian en todas las bolsas del mundo.

Bachelier supuso que el precio de las acciones es una variable aleatoria y que los cambios en los precios son independientes e idénticamente distribuidos, tal que:

$$\text{Prob}\{\tilde{Z} < Z^* \mid \tilde{Z} = Z\} = F(Z^* - Z, t) \quad [1]$$

Donde $F(\cdot)$ es la función de distribución acumulada de los precios de las acciones. Esta ecuación expresa que la probabilidad de que el precio de la acción dentro de t períodos (\tilde{Z}) sea menor o igual a un cierto valor, Z^* , sabiendo que el precio actual es Z , puede ser expresado como una función de la distancia ($Z^* - Z$) y t .

El trabajo de Bachelier, a pesar de no haber sido recogido por la teoría económica hasta seis décadas más tarde, fue pionero en dos aspectos:

- Por un lado, estableció una “prototeoría” de mercados eficientes. Anticipándose a la HME, Bachelier definió que, en un mercado especulativo, los precios de los activos deben seguir un juego justo, es decir, una martingala, de modo que el rendimiento esperado sea cero. De acuerdo con Bachelier (1900), “la esperanza matemática del especulador es cero” (p. 30). Esto implica que “Obviamente un jugador no tendrá ni ventaja ni desventaja si la esperanza matemática es cero. Entonces diremos que el juego es *justo*” (p. 32). De manera intuitiva, asumió que los cambios en los precios deberían estar idéntica e independientemente distribuidos (i.i.d.). Esta condición i.i.d. garantiza que los precios reflejen toda la información disponible.
- Por otro lado, basándose en la distribución del precio del activo subyacente, estableció la primera fórmula conocida para la valoración de opciones europeas. Supuso que los precios de las acciones evolucionaban como en un proceso matemático muy conocido en la ciencia, llamado de Márkov, en tiempo continuo.

Debe acá mencionarse a León Walras, nacido en 1834, considerado a menudo el fundador de la economía matemática. Walras fue el primero en analizar y describir como un problema matemático el equilibrio general de la competencia perfecta para explicar cómo los precios se pueden determinar por las interacciones entre los mercados. La idea que Bachelier tenía del equilibrio en el mercado recuerda a un equilibrio walrasiano al afirmar que de “la consideración de precios verdaderos, puede decirse: en un instante dado, el mercado no cree ni en un aumento ni en una disminución de precios” (p. 31). Es decir, está proponiendo un punto de equilibrio entre precios ofertados y demandados.

En esencia, Bachelier basó su modelo de valuación de derivados en un mercado completo y eficiente. En particular, postuló que:

- Los movimientos sucesivos de precios son estadísticamente independientes.
- En un mercado de competencia perfecta, toda la información disponible es incorporada en el precio. En un mercado eficiente, también los precios recogen toda la información disponible, pero se permiten ciertas desviaciones (en la medida que sean menores a los costes de transacción). En este aspecto, un mercado eficiente podría ser definido como un mercado de competencia perfecta con costes de transacción.
- En un mercado completo, siempre hay vendedores y compradores a un determinado precio. Necesariamente tienen opiniones opuestas acerca de futuros movimientos de precios y, por lo tanto, en promedio el mercado no cree ni en una subida ni en una bajada de precios.

El trabajo de Bachelier no está exento de limitaciones, en parte, debido a la novedad del tema y, en parte, quizás, por no percibir ciertas implicaciones económicas de su modelo. Por ejemplo, Bachelier adoptó un movimiento browniano aritmético, sin caer en la cuenta de que estaba permitiendo que los precios asumieran valores negativos. Asimismo, Bachelier deduce de la ecuación [1] que la función de densidad de probabilidad es del tipo más común, llamado gaussiano. En realidad, esto no es necesariamente cierto, ya que cualquier miembro estable de la conocida familia de distribuciones estadísticas de Pareto-Lévy satisface la ecuación, siendo la distribución gaussiana sólo un caso particular de esa vasta familia. Además, Bachelier supone que la esperanza matemática del rendimiento es cero, lo cual importa indiferencia por la liquidez y neutralidad al riesgo. Contrariamente, los modelos que se desarrollaron en la segunda mitad del siglo XX suponen que el rendimiento esperado es constante, pero distinto de cero.

Esta tesis permaneció en el olvido hasta que Paul Samuelson la encontró, casi por casualidad, en la Biblioteca de la Universidad de Harvard y le dio difusión entre sus allegados. Precisamente, Samuelson fue quien formalizó la difusión de los precios en un mercado competitivo mediante un movimiento browniano geométrico y, desde entonces, se ha utilizado esta modelización como verdadera descripción de la dinámica de precios en competencia perfecta.

EL MOVIMIENTO BROWNIANO FRACCIONAL: LOS MERCADOS TIENEN MEMORIA

Muchos de los modelos actualmente en uso se basan en este supuesto subyacente. En particular, la conocida fórmula para la valuación de opciones financieras desarrollada por Fisher Black y Myron Scholes depende de que el comportamiento de los precios siga un movimiento browniano. Otra herramienta muy utilizada en la gestión de riesgo por las empresas es el concepto de *Value at Risk* (VaR). En resumidas cuentas, lo que mide el VaR es la pérdida máxima esperada, si se produce un acontecimiento adverso. Por tanto, si detectamos que la dinámica de precios no sigue un movimiento browniano, los instrumentos mencionados dejan de ser representativos de la realidad. Precisamente, desde la econofísica se han encontrado evidencias importantes de que la dinámica de precios se desvía reiteradamente del movimiento browniano. En particular, las series de precios tienen un componente (mayor o menor) de memoria de largo plazo.

El matemático francés contemporáneo Benoît Mandelbrot observó que la serie de diferencias logarítmicas de precios diarios del algodón era más puntiaguda que una distribución gaussiana. También pudo detectar que presentaban valores extremos más frecuentes de lo que se esperaría de una distribución gaussiana, provocando colas de distribución más densas. Estas colas densas hacen que los eventos extremos (grandes caídas o grandes subidas) se presenten más frecuentemente de lo esperado en una distribución gaussiana. Estas observaciones le hicieron descartar la idea del movimiento browniano estándar y la distribución normal de la serie temporal. Como alternativa, Mandelbrot propuso, en una serie de trabajos, un proceso estocástico con memoria de largo plazo y una distribución de Pareto, generalización de la gaussiana, estable.

Su modelo se mueve en dos direcciones. En primer lugar, relaja el supuesto de varianza finita, introduciendo el llamado “efecto Noé”, o de aluvión, en que las cotizaciones pegan saltos bruscos sin pasar por estadios intermedios, lo que permite variaciones muy bruscas y genera una suerte de discontinuidad en la serie. En segundo lugar, relaja la hipótesis de independencia, dando lugar al “efecto José”.

El “efecto José” de Mandelbrot, hace referencia al relato bíblico en el que José vaticinó (interpretando el sueño del faraón) que los habitantes de Egipto sufrirían siete años de abundancia y luego siete años de miseria. Con ello, Mandelbrot intentó destacar la propiedad de algunas series temporales, que exhiben más persistencia de lo esperado en una serie absolutamente aleatoria, pero sin mostrar una dependencia de corto plazo (que se denomina markoviana) significativa. Esta persistencia es recogida por el llamado movimiento browniano fraccional, que exhibe memoria de largo plazo, mientras que el browniano original no tiene memoria.

En este nuevo modelo, las variables aleatorias no están descorrelacionadas y, por tanto, en lugar de describir lo que se llama un “ruido blanco” (que quiere decir, precisamente, que no hay correlaciones), describen un “ruido coloreado”. La influencia de Mandelbrot en la econofísica es muy importante, ya que abrió un campo de investigación que no se limita a los economistas sino a muy diversas disciplinas. Por otra parte, su modelo trazó un puente entre el desarrollo de modelos teóricos y su verificación empírica.

LA HIPÓTESIS DEL MERCADO EFICIENTE EN EL SIGLO XXI

Podemos decir que, hasta la década de 1980, la Hipótesis del Mercado Eficiente (y su correspondiente modelización como movimiento browniano estándar) estaba casi incuestionada (a excepción de trabajos como los de Mandelbrot).

Sin embargo, en esos años comienzan a aparecer estudios empíricos que encuentran con frecuencia una incompatibilidad entre la teoría y las observaciones. Poco a poco, se comienza a poner en cuestión el paradigma dominante de comportamiento racional y ausencia de memoria en los precios financieros. Esto dio pie a que personas provenientes de otras disciplinas, en particular, físicos, comenzaran a analizar los datos e intentaran formular modelos más genéricos y universales que pudieran incluir distintos tipos de mercados.

El prestigioso econofísico J. Doyne Farmer afirma que una de las tendencias más prometedoras en la investigación financiera de hoy es la modelización del mercado desde una perspectiva biológica, concretamente, dentro de un entorno evolutivo donde mercados, instrumentos e inversores interactúan y evolucionan dinámicamente de acuerdo a una regla de selección económica. Desde esta perspectiva, los agentes compiten y se adaptan, pero no necesariamente en forma óptima, lo que permite que los precios no se comporten de un modo completamente aleatorio.

Los modelos que incluyen variables psicológicas, como las propuestas de Daniel Kahneman, focalizan su interés en el modo en que la psicología humana influye en el proceso de toma de decisiones, permitiendo desvíos del comportamiento racional. Junto con los modelos basados en el agente (*agent-based models*) pueden aportar una nueva vía de investigación. Estos modelos intentan capturar el proceso de aprendizaje y las dinámicas de los mercados financieros utilizando estructuras más realistas. Si bien los modelos evolutivos todavía se encuentran en sus inicios, permiten inferir que las estrategias de los agentes evolucionan y, a medida que evolucionan, los mercados se vuelven más eficientes.

La aplicación de la metáfora evolutiva no es nueva en economía. Mencionemos así las teorías de Joseph Schumpeter, ministro de Finanzas en Austria (1919-1920) y profesor de Harvard desde 1932 hasta su muerte en 1950. Schumpeter habla de los ciclos económicos, la innovación y la destrucción creativa, lo que tiene un aire evolucionista. La idea central de la perspectiva evolutiva es que los individuos no maximizan una utilidad esperada, sino que maximizan la supervivencia de su material genético. El comportamiento de los individuos depende del entorno en que se muevan. Esta teoría evolutiva también se hace eco de la idea de racionalidad limitada desarrollada por Herbert A. Simon a mediados del siglo XX. Es cuestión de reeditar esta metáfora evolutiva para incluirla en los modelos. Destacamos que a Simon, en 1978, le fue concedido el premio Nobel de Economía por ser uno de los investigadores más importantes en el terreno interdisciplinario y porque su trabajo ha contribuido a racionalizar el proceso de toma de decisiones.

El *crack* bursátil de 1987, la burbuja de las *dotcom* de los años noventa (y la posterior explosión de la burbuja), así como la más reciente expansión del mercado bursátil e inmobiliario que culminó en la crisis llamada *subprime*, son ejemplos de valuaciones del mercado que se alejaron en forma consistente de sus valores fundamentales. Estos fallos explicativos de la Hipótesis del Mercado Eficiente han minado, en cierto modo, su credibilidad.

En estos años, los físicos también han contribuido, en colaboración con economistas, al desarrollo de modelos de los mercados más realistas. Es un hecho indiscutido que los extremos de las distribuciones de probabilidad de los rendimientos de acciones y bonos no siguen una distribución gaussiana y, tal como anticipó Mandelbrot, tienen una densidad de probabilidad mayor. Esto ocurre también en determinados fenómenos naturales. Por otro lado, la modelización ecológica de los mercados, mediante la interacción de agentes adaptativos, puede aportar un efecto dinámico a las relaciones económicas.

Un hallazgo significativo en econofísica se refiere a la importancia de las características cualitativas de los mercados, como por ejemplo, que un factor determinante de la dinámica del mercado es la diversidad de comportamientos estratégicos de los agentes. Los mercados funcionan bastante bien si los participantes actúan utilizando muchas estrategias diversas, pero el funcionamiento se distorsiona si muchos participantes usan pocas estrategias o las replican. Hay un punto en el que la cantidad de agentes que están usando un mismo conjunto limitado de estrategias se convierte en crítico y genera una transición abrupta de fase que culmina en una crisis. Hoy en día, las estrate-

gias de *trading* de los grandes bancos se realizan de manera automática. Una computadora lleva a cabo unos determinados algoritmos (que por cuestiones de tiempo computacionales son sencillos y poco variados) y emite una señal de compra o de venta que se transmite automáticamente al mercado vía internet. Si muchos agentes utilizan los mismos algoritmos, las señales de compra o venta amplifican la variación y terminan colapsando el mercado, convirtiendo la crisis en una profecía auto-cumplida.

Otro aporte reciente desde la física ha sido el estudio de los mercados financieros utilizando la llamada teoría de redes. Esta técnica ha ayudado a explicar ciertas fuentes de inestabilidad de los mercados. De acuerdo con la teoría financiera estándar, la distribución de los riesgos entre las instituciones financieras, a través de instrumentos financieros derivados o mediante diversificación, hace que cada empresa y, por extensión, el conjunto del mercado sea más seguro y estable. Sin embargo, una red sobre-conectada puede hacer más fácil la propagación de una crisis. Esto es lo que, en cierto modo, sucedió con la crisis global del 2007-2008. Tenemos un sistema financiero global muy interconectado, con gran facilidad para el movimiento de capitales. Al no tener ningún “compartimiento estanco”, la crisis se propagó de inmediato. Casi todos los bancos del mundo, en forma directa o indirecta, tenían algún activo tóxico procedente de las hipotecas *subprime*. Paradójicamente, los países que salieron más indemnes de la crisis financiera fueron aquellos con un sistema financiero menos desarrollado: la carencia de conexión con las finanzas globales fueron su escudo ante la crisis.

Dado que la teoría económica dominante fue concebida desde la óptica de la mecánica newtoniana, sus modelos se basan en el supuesto de que el sistema está en equilibrio. Este equilibrio solo es afectado por perturbaciones exógenas: un *shock* en el precio del petróleo o un nuevo invento que mejora la eficiencia, por ejemplo. En cambio, si introducimos como variables endógenas de los modelos las innovaciones o los shocks, queda claro que la propia fuente de inestabilidad está dentro del modelo. Es decir, la inestabilidad es inherente al sistema económico, donde el equilibrio es solo un estado momentáneo. Así como en la física se desarrolla toda una rama dedicada a la mecánica estadística del no equilibrio (*nonequilibrium statistical mechanics*), podría ser un buen punto de partida pensar los sistemas económicos desde el desequilibrio e ir más allá de la mecánica clásica. Así como hay sistemas físicos a los cuales una pequeña perturbación lo conduce cada vez más lejos del equilibrio, deberíamos estudiar esos puntos de criticalidad que hacen que un sistema económico aparentemente estable colapse en un período relativamente corto de tiempo.

Por lo tanto, si bien la investigación en finanzas ha avanzado bastante, creemos que la aportación de la econofísica puede plantear un punto de vista alternativo para pensar sobre el modo de formación de los precios en un mercado. Sería deseable avanzar hacia un cuerpo teórico alternativo que pueda incluir los comportamientos de los mercados que hoy vemos como anómalos. Existen muchas metodologías y modelos que han sido probados con éxito en sistemas físicos y que podrían ayudarnos a comprender un cierto comportamiento universal de variables económicas. La modelización de sistemas complejos dinámicos, considerando la heterogeneidad de los agentes económicos, puede ayudarnos a comprender mejor el denso entramado que conforman las decisiones económicas. Los conceptos de criticalidad y de desequilibrio deberían centrar la investigación económica. Deberíamos ir hacia modelos universales, pero a la vez realistas, de nuestros mercados. Estas son algunas de las direcciones que parecen cobrar fuerza en la investigación econofísica, aunque aún queda mucho por hacer.

REFERENCIAS

1. Un TB contiene un millón de millones de *bytes*. Un *byte* es la unidad usual de información.
2. El gran economista londinense David Ricardo, nacido en 1772, es fundador de la corriente de pensamiento llamada clásica, junto a Adam Smith y Thomas Maltus.
3. El número esperado de individuos que supere al mercado en cada uno de los diez años será $2000 \cdot 2^{-10} = 1,95$. Es más, la probabilidad de que ningún individuo supere al mercado en alguno de los diez años es $(1-2^{-10})^{2000} = 0,1416$.

REFERENCIAS

- Bachelier, L. (1900). *Théorie de la spéculation*. *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, París.
- Cootner, P. H. (1964). *The Random Character of Stock Market Prices*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Farmer, J. D. y Geanakoplos, J. (2008). "The Virtues and Vices of Equilibrium and the Future of Financial Economics". *Cowles Foundation Discussion Paper*, N.º 1647. New Haven, Connecticut: Yale University.
- Farmer, J. D. y Lo, A. W. (1999). "Frontiers of Finance: Evolution and Efficient Markets". *Proceedings of the National Academy of Science*, 96(18), pp. 9991-9992.
- Friedman, M. (1958). "La metodología de la economía positiva". *Revista de economía política*, 21, pp. 355-397. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2496353.pdf>
- Mandelbrot, B. B. y Hudson, R. L. (2004). *The (Mis)behaviour of Markets: a Fractal View of Risk, Ruin and Reward*. New York: Basic Books.

Aurelio Fernández Bariviera es doctor en Economía por la Universidad Rovira i Virgili (España). Ha realizado estudios de posgrado en Economía y Política de la Unión Europea en la Universidad de Padua (Italia). Ha sido asistente de investigación en SRI International (antiguamente Stanford Research Institute) y auxiliar docente en la Universidad Nacional de La Plata. Actualmente, es profesor en la Facultad de Economía y Empresa de la Universidad Rovira i Virgili. Sus actividades de investigación se centran en finanzas cuantitativas, econofísica, teoría de la información, teoría del caos, sistemas dinámicos y sus aplicaciones a diversos campos de la economía.

UNNOBA LA UNIVERSIDAD

La Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA) es una universidad nacional, pública y gratuita que desempeña un rol de liderazgo en la región.

Con sedes en Junín y Pergamino, en el corazón agrícola-ganadero de la República Argentina, aproximadamente a 250 kilómetros de la ciudad de Buenos Aires.

Actualmente cuenta con cerca de 10 000 estudiantes provenientes de todo el país. Desde su creación en el año 2002, y aprovechando el contexto geográfico en el que se inserta, ha logrado posicionarse como un referente estratégico.

En su visión promueve el espacio interdisciplinario de interacción de la investigación, la docencia, la extensión y la transferencia, en un marco de calidad y pertinencia y en un clima de libertad, democracia, justicia y solidaridad.



OFERTA ACADÉMICA

ESCUELA DE TECNOLOGÍA

DISEÑO

- Licenciatura en Diseño de Indumentaria y Textil | 5 años
- Tecnicatura en Diseño de Indumentaria y Textil | 3 años
- Licenciatura en Diseño Gráfico | 5 años
- Tecnicatura en Diseño Gráfico | 3 años
- Licenciatura en Diseño Industrial | 5 años
- Tecnicatura en Diseño Industrial | 3 años

INFORMÁTICA

- Ingeniería en Informática | 5 años
- Licenciatura en Sistemas | 5 años
- Analista de Sistemas | 3 años
- Tecnicatura Universitaria en Soporte Informático | 3 años

INGENIERÍA

- Ingeniería Industrial | 5 años
- Ingeniería Mecánica | 5 años
- Tecnicatura en Mantenimiento Industrial | 3 años
- Tecnicatura en Mantenimiento Ferroviario | 3 años

INST. ACADÉMICO DE DESARROLLO HUMANO

SALUD

- Licenciatura en Enfermería | 4 ½ años
- Enfermería Universitaria | 3 años

ESC. DE Cs. ECONÓMICAS Y JURÍDICAS

ECONÓMICAS

- Licenciatura en Administración | 4 años
- Contador Público | 4 años
- Tecnicatura en Gestión Pública | 2 ½ años
- Tecnicatura en Gestión de Pymes | 2 ½ años

JURÍDICAS

- Abogacía | 5 años
- Martillero y Corredor Público | 3 años

ESC. DE Cs. AGRARIAS, NATURALES Y AMBIENTALES

AGRONOMÍA

- Ingeniería Agronómica | 5 años

ALIMENTOS

- Ingeniería en Alimentos | 5 años
- Tecnicatura en Producción de Alimentos | 3 años

GENÉTICA

- Licenciatura en Genética | 5 años

